

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Осіновий Геннадій Геннадійович

УДК 621.396.96

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ АКТИВНОГО І ПАСИВНОГО ЗАХИСТУ МАЛОРОЗМІРНИХ
НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ВІД МАТРИЧНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ
ПАСИВНО-АКТИВНИХ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ МІЛІМЕТРОВОГО
ДІАПАЗОНУ

Спеціальність 105 – прикладна фізика та наноматеріали

10 – Природничі науки

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Г.Г. Осіновий

Науковий керівник **Биков Віктор Миколайович**, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Осіновий Г.Г. Методи активного і пасивного захисту малорозмірних наземних об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали (природничі науки). – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2019.

У дисертації вирішена актуальна наукова задача зниження радіометричної помітності малорозмірних наземних рухомих об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

Під радіометричною помітністю розуміється можливість виявлення (чи не виявлення) наземного (рухомого) об'єкту з потрібною ймовірністю на означеній дальності.

Мета та задачі досліджень. *Метою дисертаційної роботи є зниження ймовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів на основі застосування активних і пасивних методів і засобів захисту.*

Для досягнення поставленої мети послідовно вирішувались наступні задачі:

1. Розробка моделі захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.
2. Розробка методики оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону з широкосмуговим шумовим підсвічуванням.
3. Розробка метода активного захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивних радіометричних систем міліметрового діапазону.
4. Розвиток декомпозиційного метода формування радіометричних зображень малорозмірних наземних об'єктів в ближній та проміжній зонах

антени пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим чи вузькосмуговим детермінованим сигналом.

5. Експериментальне підтвердження ефективності методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем міліметрового діапазону.

Розроблені та удосконалені моделі і методи положено в основу створеної в роботі методики оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних, в тому числі рухомих наземних об'єктів пасивно-активними радіометричними системами виявлення та ідентифікації міліметрового діапазону. Методика дозволяє урахувати велику кількість факторів (міцність і багатопозиційну побудову джерела підсвічування, ширину смуги пропускання приймача радіометричної (РМ) системи, характеристики антени джерела підсвічування і РМ системи) і умов візування РМ системи (кути візування, розміри і конфігурацію об'єкта, вплив атмосферних гідрометеорів), які впливають на процес виявлення чи не виявлення малорозмірних наземних об'єктів. Отримані в роботі аналітичні вирази дозволяють оцінити вплив на процес виявлення застосованих методів і засобів захисту, і таким чином оцінити ефективність засобів зниження помітності малорозмірних наземних рухомих об'єктів від радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

У першому розділі дисертації (*Аналіз стану питання захисту наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем виявлення*) на основі проведеного аналізу побудови і функціонування існуючих систем виявлення, розташованих на літальних апаратах (ЛА), в нашій державі та за її межами обґрунтовані та конкретизовані основні тактико-технічні вимоги (ТТВ) до радіометричних систем виявлення, і їх кількісні показники: середньоквадратична похибка (СКП) менш 10 м; ймовірність візування наземних об'єктів більш 0,9; швидкодія функціонування систем виявлення високошвидкісних літальних апаратів менш 0,1 с.

Проведено аналіз відомих наукових результатів в області дослідження й розробки матричних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону

(ММД) та визначені напрямки розвитку теорії маскуванню від РМ систем виявлення.

У другому розділі (*Модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем виявлення*) на основі визначення основних факторів, які заважають функціонуванню РМ систем виявлення високошвидкісних ЛА, внаслідок спотворення поточних радіометричних зображень і розв'язувальної функції алгоритму суміщення зображень, *удосконалена модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем виявлення ММД.*

В моделі запропоновані і проаналізовані:

- метод активного захисту малорозмірних наземних об'єктів, який полягає в вирівнюванні температур радіояскравості об'єкта і фону, що призводить до зниження радіотеплового контрасту «малорозмірний об'єкт – фон земної поверхні», завдяки власного підсвічування об'єкта ширококутовим шумовим випромінюванням;

- метод пасивного захисту від радіометричних систем виявлення, який полягає в застосуванні маскувальних покриттів, що також знижує контраст «об'єкт – фон» нижче означеного для радіометричних систем виявлення порогу, що призводить до екранування об'єкту.

Застосування вказаних методів повинно знизити ймовірність і зменшити дальність виявлення малорозмірних наземних об'єктів радіометричними пасивно-активними системами виявлення міліметрового діапазону.

На основі даної моделі отримано остаточне співвідношення для розв'язувальної функції алгоритму суміщення зображень в кореляційно-екстремальній системі виявлення. В даному співвідношенні оператори методу активного (оператор джерела власного шумового підсвічування $F_{\text{двшп}}$) і пасивного (оператор маскуванню F_m) захисту наземного об'єкту внесені до оператору поверхні візування.

У третьому розділі (*Розробка методики оцінки імовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними*

пасивно-активними системами) удосконалено методику оцінки ймовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону, яка, на відміну від відомих методик, дозволяє оцінити зниження дальності виявлення матричними радіометричними системами в пасивному режимі і в режимі з широкосмуговим шумовим підсвічуванням об'єкта під маскувальним покриттям в площині кутів місця і азимуту.

Згідно до критерію Неймана-Пірсона для двох альтернативного виявлення отримані вирази для ймовірності хибної тривоги та правильного виявлення малорозмірного наземного об'єкта. Ці вирази отримані за умови матричної побудови радіометричної системи виявлення.

В роботі отримано аналітичний вираз для контрасту радіояскравості на вході радіометричного приймача пасивно-активної системи виявлення. Вираз складається з двох частин, які формуються пасивним випромінюванням об'єкту (фону) і відбитим від об'єкту (фону) випромінюванням, яке формується завдяки штучному підсвічуванню об'єкту. Отримано аналітичний вираз для дальності виявлення об'ємного малорозмірного наземного об'єкту, за умови візування об'єкта РМ системою з підсвічуванням під різними кутами місця і азимуту.

Застосування пасивних систем захисту (маскувальних покриттів) малорозмірних наземних об'єктів, що знижують випромінювальну здатність, наприклад, на 10 дБ, зменшує дальність виявлення об'єктів пасивно-активними системами не менш ніж у три рази.

У четвертому розділі (*Розробка методу вирівнювання радіотеплових температур об'єкта і фону на вході радіометричного приймача пасивної системи виявлення та розвиток декомпозиційного методу вимірювання електрофізичних характеристик наземного об'єкта складної форми*) *вперше розроблено метод вирівнювання температур радіояскравості об'єкта і фону на вході радіометричного приймача, що забезпечує зниження контрасту «наземний об'єкт – фон земної поверхні» до значень, які не дозволяють виявити об'єкт на заданій дальності пасивним радіометричним приймачем системи виявлення*

супротивника. В рамках даного методу вперше зроблено висновок про те, що джерело власного шумового підсвічування генерує шумовий сигнал в сторону наземного об'єкта, що виявляється супротивником, поступово міцність сигналу підсвічування збільшується до тих пір, поки особистий РМ датчик, який знаходиться на одній платформі з джерелом власного підсвічування, не прийме сигнал, пере відбитий наземним об'єктом, з мінімальним, зокрема нульовим, контрастом «об'єкт – фон», що зменшує ймовірність і дальність виявлення об'єкта пасивною радіометричною системою розвідки.

Застосування активного підсвічування об'єктів власним джерелом шумового підсвічування з керованою міцністю дозволяє забезпечити малий за рівнем (майже нульовий) контраст «об'єкт – фон земної поверхні» на вході радіометричного приймача пасивної системи виявлення практично на будь-якій дальності від системи виявлення до малорозмірного наземного об'єкту.

Отримав подальший розвиток метод декомпозиції, який дозволяє формувати радіометричне зображення малорозмірного наземного об'єкта не тільки в дальній зоні антени, а і в ближній та проміжній зонах антени пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим чи вузько-смуговим детермінованим випромінюванням.

Новизна методу полягає в тому, що зображення наземного об'єкту складної конфігурації формується як сума полів випромінювання окремих елементів розрізнювання об'єкта шляхом сканування радіометричним датчиком міліметрового діапазону з однієї точки у ближній, проміжній і дальній зонах антени.

Застосування даного методу дозволяє оцінювати характеристики засобів маскування як в окремих частинах об'єкта, так і засобів маскування об'єкта в цілому.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені теоретичні положення, математичні моделі, методи, методика складають основу для проектування і створення систем і засобів захисту малорозмірних наземних (рухомих) об'єктів від пасивно-активних

радіометричних систем виявлення, які функціонують в міліметровому діапазоні хвиль.

Ключові слова: високошвидкісні літальні апарати, міліметровий діапазон, матричні кореляційно-екстремальні системи виявлення, активні і пасивні системи захисту, маскувальні покриття.

ABSTRACT

Gennadiy G. Osinovyy. Methods of active and passive protection of small-sized ground objects from matrix radiometric passive-active detection systems of millimeter range. – Qualification scientific paper, manuscript.

Thesis of a Doctor of Philosophy in specialty 105 – applied physics and nanomaterials (natural sciences). – V.N. Karazin Kharkiv National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

This dissertation solves an actual scientific problem of reduction of radiometric signature of small-sized ground mobile objects using passive-and-active radiometric systems of millimeter range.

Radiometric signature is feasibility of detection (or non-detection) of a ground (mobile) object with required probability at definite range.

A purpose and tasks of studies. A purpose of this dissertation is reduction of probability and range for detection of small-sized ground objects using active and passive methods and protection means.

The following partial tasks of investigations were sequentially solved for realization of that purpose :

1. Development of a model for protection of small-size ground objects from passive-and-active radiometric detection systems of millimeter range.
2. Elaboration of methods for evaluation of probability and range for detection of small-sized ground objects by matrix radiometric systems of millimeter range with wide-band noise lighting.
3. Elaboration of a method of active protection of small-sized ground objects from passive radiometric systems of millimeter range.
4. Elaboration of decomposition method for formation of radiometric images of small-sized ground objects in the near and intermediate zones of an antenna by a passive radiometric sensor with lighting by a wide-band noise or a narrow-band determinate signal.

5. Experimental verification of efficiency of methods and means for protection of small-sized ground objects from passive-and-active radiometric systems of millimeter range.

Developed and updated models and methods were used as a basis of methods (created in this study) for evaluation of probability and range of detection of small-sized ground objects (including mobile objects) by passive-and-active radiometric detection and identification systems of millimeter range. Those methods allow to take into account a great number of factors (strength and multi-positional structure of a lighting source, pass bandwidth of a receiver of a radiometric (RM) system, characteristics of an antenna of a lighting source and RM system), and conditions for RM system sighting (sighting angles, dimensions and configuration of an object, influence of atmospheric hydrometeors) which affect the process of detection or non-detection of small-sized ground objects. Analytical expressions and formulas (obtained in this study) allow evaluating the influence of applied methods and protection means on the detection process; so, they allow evaluating the efficiency of means for reduction of signature of small-sized ground mobile objects from radiometric detection systems of millimeter range.

In the first section of this dissertation (*Analysis of status of the issue of protection of ground objects from radiometric passive-and-active detection systems*), on the basis of performed analysis of a structure and functions of available detection systems placed in Flight Vehicles (FV) in our state and abroad, we have substantiated and specified basic Tactical-and-Technical Requirements (TTR) for radiometric detection systems, and their quantitative indices: mean square error (MSE) is less than 10m; probability of sighting the ground objects is more than 0.9; response speed of functions of systems for detection of high-velocity flight vehicles is less than 0.1s.

We have analyzed the known scientific results in the sphere of investigation and development of matrix radiometric detection systems of millimeter range (MMR) and determined the directions for elaboration of a theory of signature reduction measures and protection from RM detection systems.

In the second section (*Model for protection of small-sized ground objects from radiometric passive-and-active detection systems*) on the basis of determination of basic factors which prohibit the functions of RM systems for detection of high-velocity FVs, as a result of distortion of current radiometric images and a decision function of image registration algorithm, we have updated a model for protection of small-sized ground objects from MMR detection radiometric passive-and-active systems.

The following methods were proposed and analyzed in the model:

- a method for active protection of small-sized ground objects which includes alignment of temperatures of radio brightness of an object and background that leads to reduction of radio thermal contrast «small-sized object – Earth surface background» due to individual lighting of an object by wide-band noise radiation;
- a method for passive protection from radiometric detection systems which includes the use of mask coatings that also reduces the contrast «object – background» to more lower level than it was determined, for radiometric detection systems, threshold that leads to screening (shielding) an object.

The use of the above methods shall reduce the probability and the range of detection of small-sized ground objects by radiometric passive-and-active detection systems of millimeter range.

On the basis of this model, we obtained a final correlation for a decision function of image registration algorithm in the correlation-extreme detection system. In this correlation, operators of the active method (operator of individual noise lighting source $F_{\text{дбшп}}$) and the passive method (operator of signature reduction $F_{\text{м}}$) of protection of a ground object are included into the sighting surface operator.

In the third section (*Elaboration of the methods for evaluation of probability and range of detection of small-sized ground objects by matrix radiometric passive-and-active systems*), we have updated the methods for evaluation of probability and range of detection of small-sized ground objects by matrix radiometric systems of millimeter range. Those methods, unlike known methods, allow to evaluate the reduction of detection range by matrix radiometric systems in the passive mode and

in the mode with wide-band noise lighting of an object, under the mask coating, in the plane of elevation angles and azimuth.

In accordance with Neumann-Pearson criterion for two-decision detection, we obtained expressions for probability of false alarm and correct detection of small-sized ground object. Those expressions are obtained on condition of matrix structure of radiometric detection system.

In this study, we obtained an analytical formula for contrast of radio brightness which is received by a radiometric receiver (at its inlet) of the passive-and-active detection system. That formula consists of two parts which are formed by passive radiation of an object (background) and radiation (background) reflected from the object which is formed due to artificial lighting of an object. We also obtained an analytical formula for detection range of 3-D small-sized ground object, on condition of sighting an object by RM system with lighting at different elevation angles and azimuth.

Use of passive protection systems (mask coatings) of small-sized ground objects that lower the radiating power, for example, by 10 dB, it reduces the range of detection of objects by passive-and-active systems not less than thrice.

In the fourth section (*Elaboration of a method for alignment of temperatures of radio brightness of an object and background of a radiometric receiver (at its inlet) of a passive detection system and development of decomposition method of measurement of electrophysical characteristics of ground object of complex form*), for the first time we have elaborated a method for alignment of temperatures of an object's radio brightness and background at the inlet of a radiometric receiver, it supports the reduction of contrast «ground object – Earth surface background» up to values which do not allow to detect an object at given range by a passive radiometric receiver of an enemy's detection system. Within the frames of this method, we have (for the first time) drawn a conclusion that a source of individual noise lighting generates a noise signal to a ground object's side (which is detected by an enemy), power of lighting signal gradually increases up to the time when an individual RM sensor (which is placed on the same platform with individual lighting source)

receives a signal re-reflected by a ground object with minimum, in particular, zero contrast «object – background» which reduces the probability and range of detection of an object by a passive radiometric reconnaissance system.

Use of active lighting of objects by individual source of noise lighting with controlled power allows to support small (almost zero) contrast «object – Earth surface background» at an inlet of a radiometric receiver of a passive detection system, practically at any range from a detection system up to a small-sized ground object.

A decomposition method have been further elaborated which is used for formation of radiometric image of a small-sized ground object not only in a far-field zone of an antenna , but also in the near and intermediate zones of an antenna by a passive radiometric sensor with lighting by wide-band noise or narrow-band determinate radiation.

Novelty of this method is in a fact that image of a ground object of a complex configuration is formed as a sum of radiation fields of some elements of identification of an object by way of scanning by a radiometric sensor of millimeter range from one point in a near, intermediate and far-field zones of an antenna.

Use of this method allows evaluating characteristics of mask means both in individual parts of an object and masking means and equipment of an object as a whole.

Practical importance of obtained results is in a fact that elaborated theoretical provisions, mathematical models, methods and methodology are a basis for designing and creation of systems and means for protection of small-sized ground (mobile) objects from passive-and-active radiometric detection systems which function in millimeter wavelength range.

Key words: high-velocity flight vehicles, millimeter range, matrix correlation-extreme detection systems, passive-and-active protection systems, mask coatings.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові публікації у фахових виданнях України

1. Быков В.Н., Колчигин Н.Н., Осинский Г.Г., Бережная Т.Д. Оценка эффективности средств защиты малоразмерных наземных объектов от пассивно-активных радиометрических систем обнаружения // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника». Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2016. Т. 15, № 1. С. 45 – 50.

(Особистий внесок аспіранта: оцінка ймовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів пасивно-активними радіометричними системами виявлення за запропонованою методикою)

2. Быков В.Н., Быков С.Н., Колчигин Н.Н., Лотох Н.Г., Осинский Г.Г. Метод активной защиты малоразмерных наземных объектов от пассивных радиометрических систем обнаружения // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника». Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2017. Т. 16, № 1,2. С. 13 – 17.

(Особистий внесок аспіранта: постановка задачі, оцінка ефективності методу активного захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивних систем виявлення).

3. Быков В.Н., Быков С.Н., Винниченко С.А., Гричанюк А.М., Колчигин Н.Н., Осинский Г.Г. Развитие метода декомпозиции при формировании радиометрических изображений малоразмерных наземных объектов в ближней и промежуточной зонах антенны // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника». Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2017. Т. 16, № 3-4. С. 106– 111.

(Особистий внесок аспіранта: постановка задачі, оцінка ефективності методу декомпозиції, який полягає у формуванні радіометричного

зображення малорозмірного наземного об'єкта в ближній, проміжній та дальній зонах пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкопasmовим шумовим чи вузькопasmовим детермінованим сигналом).

4. Осіновий Г.Г. Распознавание малоразмерных наземных объектов матричной радиометрической системой миллиметрового диапазона // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2018. Вип. 28. С. 76–81.

Наукові публікації у зарубіжних виданнях

5. Antyufeyeva M.S., Butrym A.Y., Kolchigin N.N., Legenkiy M.N., Maslovskiy A.A., Osinovy G.G. Specific RCS for describing the scattering characteristic of complex shape objects // Progress In Electromagnetics Research M. 2016. Vol. 52. P. 191-200. (SCOPUS, Web of Science)
(Особистий внесок аспіранта: участь у аналізі та обговоренні результатів чисельного експерименту, щодо можливості зниження помітності наземного об'єкту)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Bykov V.N., Bykov S.N., Grichanyuk A.M., Kolchigin N.N., Krayushking V.A., Osinovy G.G., Radzikhovsky V.N., Berezhnaya T.D. The matrix radiometric system for the imaging of ground objects in the millimeter band // MSMW 2016: 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, 20-24 June, 2016, Kharkiv, 2016. 7538063. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7538063>. (SCOPUS)
(Особистий внесок аспіранта: систематизація і аналіз характеристик матричних радіометричних систем виявлення).
7. Bykov V., Bykov S., Kolchigin N., Berezhnaya T.D., Osinovy G. Methods of assessing the effectiveness of the protection of small ground objects from passive-active radiometric detection systems // UWBUSIS 2016 : 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5-11 Sept. 2016, Odessa, 2016. 7724176, P. 156-159. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7724176>. (SCOPUS)

(Особистий внесок аспіранта: розробка методики оцінки ймовірності і дальності виявлення наземних об'єктів).

8. Bykov V.N., Bykov S.N., Lotoh N.G., Kolchigin N.N., Osinovy G.G., Berezhnaya T.D. Methods of Active Protection of Small-Sized Ground Objects from Radiometric Millimeter Range Detection Systems // UWBUSIS 2018 : 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 4-7 Sept. 2018. Odessa, 2018. 8520172, P. 243-246. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7724176>. (SCOPUS)

(Особистий внесок аспіранта: виконання розрахунків та оцінка ефективності засобів активного захисту наземних об'єктів від радіометричних систем виявлення).

Наукові публікації, що додатково відображають зміст дисертації

9. Быков В.Н., Иванченко Д.Д., Колчигин Н.Н., Краюшкин В.А., Осиновый Г.Г., Радзиховский В.Н. Малогабаритные всепогодные датчики внешнего поля для систем навигации летательных аппаратов // Системы озброєння і військова техніка. 2016. Т. 45, № 1. С. 94 – 101.

(Особистий внесок аспіранта: системний аналіз складу й характеристик малогабаритних всепогодних датчиків зовнішнього поля, які застосовуються в системах виявлення наземних об'єктів).

10. Осиновый Г.Г., Быков В.Н. Модель защиты малоразмерных наземных объектов от радиометрических пассивно-активных систем обнаружения // Радиоелектронні і комп'ютерні системи: науково-технічний журнал. 2017. Т. 81, № 1. С.107–112.

(Особистий внесок аспіранта: постановка й розв'язання задачі моделювання захисту малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем виявлення).

11. Осіновий Г.Г., Субач В.П., Биков В.М., Колчигін М.М. Протидія радіолокаційним засобам виявлення наземних об'єктів // Озброєння та військова техніка : науково-технічний журнал. 2018. Т. 2, № 18. С. 66–70.

(Особистий внесок аспіранта: проведення експериментальних досліджень, оцінка результатів вимірювань, розробка практичних рекомендацій щодо створення методів і засобів захисту малорозмірних рухомих наземних об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення ММД).

12. Осіновий Г.Г., Субач В.П., Биков В.М., Колчигін М.М. Зниження радіолокаційної помітності літальних апаратів за допомогою Stealth-технологій // Озброєння та військова техніка : науково-технічний журнал. 2018. Т. 2, № 18. С. 71–74.

(Особистий внесок аспіранта: оцінка результатів експериментів, розробка практичних рекомендацій щодо створення методів і засобів захисту малорозмірних рухомих наземних об'єктів від радіоелектронних засобів розвідки).

Патенти

13. Спосіб вимірювання ефективної площі розсіювання великогабаритних об'єктів в ближній зоні: пат. 118237 Україна: МПКб G01S 13/00, G01R 29/00. № а201703909; заявл. 20.04.2017; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. С. 4.

(Особистий внесок аспіранта: постановка задачі і створення вимірювальної схеми, яка реалізує метод декомпозиції).

14. Спосіб вирівнювання температур радіояскравості об'єкта і фону на вході радіометричного приймача системи виявлення: пат. 118995 Україна: МПКб G01S 7/38 (2006.01), F41H 3/00. № а201704777; заявл. 17.05.2017; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7. С. 4.

(Особистий внесок аспіранта: розробка основ методу вирівнювання температур радіояскравості на вході радіометричного приймача пасивної системи виявлення).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	21
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗАХИСТУ НАЗЕМНИХ ОБ’ЄКТІВ ВІД РАДІОМЕТРИЧНИХ ПАСИВНО-АКТИВНИХ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ.....	30
1.1 Аналіз принципів побудови та особливостей функціонування сучасних та перспективних систем і засобів виявлення.....	30
1.1.1 Постановка задачі.....	30
1.1.2 Вимоги до систем розвідки	35
1.1.3 Принципи функціонування автономних систем виявлення	38
1.2. Аналіз і обґрунтування основних тактико-технічних вимог, що висуваються до засобів захисту наземних об’єктів від радіометричних систем виявлення....	40
1.3 Модель виявлення малорозмірних наземних об’єктів радіометричною системою міліметрового діапазону	48
1.3.1. Постановка задачі.....	48
1.3.2 Формалізований опис процесу виявлення групового об’єкта.....	49
1.4 Аналіз відомих наукових результатів і обґрунтування напрямків досліджень в галузі розробки методів і засобів протидії пасивно-активним матричним радіометричним системам виявлення міліметрового діапазону	53
1.4.1 Фактори, що заважають роботі систем виявлення	53
1.4.2 Принципи побудови матричних радіометричних приймачів ММД..	54
1.4.3 Оцінка потенційної точності визначення координат наземних об’єктів простої і складної конфігурації	57
1.5 Розробка практичних рекомендацій щодо застосування методів і засобів захисту малорозмірних наземних об’єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону.....	58
1.5.1 Формулювання окремих задач дослідження	58
Висновки до розділу 1.....	59

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ МАЛОРОЗМІРНИХ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ВІД РАДІОМЕТРИЧНИХ ПАСИВНО-АКТИВНИХ СИСТЕМ ВІЯВЛЕННЯ.....	62
2.1. Постановка задачі.....	62
2.2 Результати розробки моделі захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону хвиль	63
2.2.1 Формування і обробка зображень в радіометричній системі виявлення	64
2.2.2 Аналіз заходів, що заважають виявленню та ідентифікації наземних об'єктів.....	66
2.2.3 Формування поточних і еталонних зображень, формування розв'язувальної функції радіометричною системою виявлення	67
2.2.4 Рекомендації щодо зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів для пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону	69
Висновки до розділу 2.....	71
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ІМОВІРНОСТІ ТА ДАЛЬНОСТІ ВІЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ МАТРИЧНИМИ РАДІОМЕТРИЧНИМИ ПАСИВНО-АКТИВНИМИ СИСТЕМАМИ	72
3.1 Розробка методики оцінки імовірності та дальності виявлення	72
3.1.1 Постановка задачі.....	73
3.1.2 Отримання аналітичних виразів для оцінки імовірності виявлення малорозмірних наземних об'єктів.....	74
3.2 Отримання аналітичних виразів для оцінки дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів.....	78
3.3 Результати оцінки імовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами	84
Висновки до розділу 3.....	87

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИРІВНЮВАННЯ РАДІОТЕПЛОВИХ ТЕМПЕРАТУР ОБ'ЄКТА І ФОНУ НА ВХОДІ РАДІОМЕТРИЧНОГО ПРИЙМАЧА ПАСИВНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК ДЕКОМПОЗИЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАЗЕМНОГО ОБ'ЄКТА СКЛАДНОЇ ФОРМИ	89
4.1 Модель захисту малорозмірного наземного об'єкта від пасивних радіометричних систем виявлення	89
4.2. Розробка методу вирівнювання радіотеплових температур об'єкта і фону на вході радіометричного приймача системи виявлення	91
4.2.1. Постановка задачі.....	91
4.2.2. Результати оцінки ступеня зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів за рахунок застосування власного шумового підсвічування	93
4.3 Результати оцінки ступеня зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів з урахуванням зміни кутів візування системи виявлення	97
4.4 Характеристика декомпозиційного методу вимірювання електрофізичних характеристик наземного об'єкта складної форми в ближній і проміжній зонах антени	99
4.1.1 Постановка задачі.....	99
4.4.2 Методика вимірювання характеристик радіолокаційного відбиття об'єктів декомпозиційним методом в ближній і проміжній зонах антени	101
4.5 Розвиток декомпозиційного методу формування радіометричних зображень малорозмірних наземних об'єктів в ближній і проміжній зонах антени радіометру	103
4.5.1 Методика проведення вимірювань	106
4.5.2. Методика розрахунку коефіцієнта випромінювання маскувального покриття на основі сітки.....	107
4.5.3. Оцінка зниження радіотеплового контрасту «об'єкт – фон»	109

4.5.4. Оцінка похибки вимірювань	109
4.6 Результати експериментальної оцінки радіотеплового випромінювання об'єктів сцени при декомпозиційному методі	111
4.7 Результати експериментальної оцінки виявлення та ідентифікації замаскованих наземних об'єктів радіометричними датчиками міліметрового діапазону	113
4.7.1 Результати експериментів	113
4.7.2. Результати напівнатурних експериментів – вимірювань температури радіояскравості малорозмірного наземного об'єкта	116
4.7.3. Результати експериментів	117
4.7.4 Висновки	121
4.8 Підтвердження нових наукових результатів, отриманих в роботі, результатами напівнатурного експерименту	123
4.9 Розробка практичних рекомендацій щодо застосування методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів	124
4.9.1 Рекомендації щодо засобів маскування	124
4.9.2 Прогноз та рекомендації	125
4.9.3. Загальні рекомендації щодо застосування методів і засобів зниження помітності для рухомих наземних об'єктів від радіометричних систем виявлення	127
Висновки до розділу 4	129
ВИСНОВКИ	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	138
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	149
ДОДАТОК Б. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи ДП “КБ “Південне” імені М.К. Янгеля”	153
ДОДАТОК В. Акт використання результатів дисертаційної роботи ДП “ХКБМ”	155

Перелік умовних позначень

АЦП	—	аналоого-цифровий перетворювач
АЧТ	—	абсолютно чорне тіло
ДСА	—	діаграма спрямованості антени
ЕПР	—	ефективна поверхня розсіювання
ІЧ	—	інфрачервоний діапазон хвиль
КЕСН	—	кореляційно-екстремальна система (навігації, виявлення)
КСД	—	коефіцієнт спрямованої дії
ЛА	—	літальний апарат
ММД	—	міліметровий діапазон хвиль
МП	—	маскувальне покриття
ОПП	—	опорно-поворотний пристрій
РЛК	—	радіолокаційний датчик
РМ	—	радіометричний датчик (приймач)
РМВК	—	радіометричний вимірювальний комплекс
РМЗ	—	радіометричне зображення
РЛС	—	радіолокаційна станція
РПМ	—	радіопоглинаючий матеріал
СВ	—	система виявлення
СМД	—	сантиметровий діапазон хвиль
СО	—	спецобчислювач
ТТВ	—	тактико-технічні вимоги

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Через збройний конфлікт на Сході України, воєнно-політичну нестабільність на Близькому Сході, боротьбу за вплив на світові фінансові та енергетичні потоки посилюється глобальна воєнно-політична нестабільність. Провідні держави збільшують розміри воєнних витрат, активізують розробку нових зразків озброєння, підвищують інтенсивність військових навчань.

Виходячи із засад внутрішньої і зовнішньої політики, з урахуванням характеру актуальних загроз національній безпеці держави, одне з основних завдань воєнної політики України, як свідчить Воєнна доктрина України [1], найближчим часом та у недалекій перспективі є:

– підвищення спроможностей вітчизняного оборонно-промислового комплексу за рахунок впровадження новітніх військових технологій, створення максимально можливих замкнених циклів розроблення і виробництва найважливіших зразків озброєння, спеціальної і військової техніки.

Результати аналізу досліджень [2 – 24] в галузі розробки систем виявлення і розвідки наземних об'єктів воєнного та цивільного призначення, а також систем наведення на малорозмірні, у тому числі рухомі, наземні об'єкти, дозволяють зробити такі висновки.

В якості носіїв засобів виявлення, розвідки і наведення застосовуються високошвидкісні літальні апарати (ЛА) – надзвукові літаки, безпілотні ЛА, балістичні та крилаті ракети.

Питання застосування тих чи інших видів систем розвідки різного роду наземних об'єктів вирішуються в ході моделювання процесу розпізнавання (виявлення та ідентифікації) об'єктів системами розвідки. У ході операцій виявлення (розвідки) повинні бути задіяні інформаційні засоби, які функціонують на різних фізичних принципах (пеленгаторні, кореляційно-екстремальні), у всіх діапазонах електромагнітних хвиль – в видимому діапазоні (оптичні засоби і системи), інфрачервоні (ІЧ) засоби, в радіодіапазоні, як

активні – радіолокаційні станції і засоби, так і пасивні – радіотеплолокаційні (радіометричні – РМ) засоби і системи короткохвильової частини діапазону (сантиметрового і міліметрового діапазонів хвиль – СМД і ММД).

Активні радіолокаційні засоби сантиметрового і міліметрового діапазонів [24], внаслідок високої надійності роботи у несприятливих погодних умовах, застосовуються у процесі розвідки з повітряних носіїв (літаків) з метою встановлення факту наявності наземних рухомих об'єктів. Аналогічні завдання вирішують космічні засоби розвідки, які функціонують у видимому, інфрачервоному, а також в сантиметровому і міліметровому діапазонах електромагнітних хвиль.

Пасивні (радіометричні міліметрового та ІЧ діапазонів), напівактивні (лазерні і радіометричні ММД) засоби і системи, а також частково радіолокаційні засоби виконують завдання виявлення і розпізнавання, забезпечують при цьому потрібну високу точність виявлення спільних координат ЛА і наземного об'єкта [25 – 33].

Слід також вказати, що перевагами пасивних систем і засобів виявлення радіодіапазону – міліметрового діапазону є підвищена скритність функціонування (робота тільки на прийом), а також більш висока, у порівнянні з видимим та ІЧ діапазонами, усепогідність, тобто висока надійність роботи у несприятливих погодних умовах, в умовах слабкого освітлення, в димах та пилових утвореннях.

У зв'язку з приведеним аналізом для ефективного захисту рухомих наземних об'єктів необхідно вживати заходи, які знижують видимість об'єктів від засобів виявлення і розвідки, які застосовують усі відомі принципи побудови систем (радіолокаційні, радіотеплолокаційні, лазерні, інфрачервоні), а також, які функціонують у всіх освоєних діапазонах електромагнітного спектру (видимому, інфрачервоному, сантиметровому і міліметровому діапазонах хвиль).

Таким чином, аналіз розвитку систем і засобів виявлення наземних об'єктів дозволяє конкретизувати наступне:

1. Набувають інтенсивного розвитку, удосконалення і широкого застосування радіолокаційні і радіометричні системи і засоби виявлення та розвідки, які функціонують у короткохвильовій частині радіодіапазону (в сантиметровому і міліметровому діапазонах хвиль) [25 – 33].

2. Це зумовлено порівняно великою дальністю дії радіосистем та їх усепогодністю. Збільшення дальності дії пасивних радіометричних систем виявлення ММД забезпечується за рахунок застосування незалежного підсвічування наземних об'єктів широкосмуговим шумовим чи детермінованим випромінюванням [34 – 41]. До цього ж пасивно-активні радіометричні системи ММД забезпечують необхідні характеристики точності та роздільної здатності.

3. Напрям досліджень щодо захисту об'єктів воєнної і спеціальної техніки від радіолокаційних і радіометричних систем виявлення полягає у зниженні радіолокаційної і радіотеплолокаційної помітності об'єктів за рахунок використання пасивних засобів захисту (маскувальних покриттів – МП), і активних засобів захисту, які екранують об'єкти та знижують коефіцієнт відбиття і випромінювання в широкому діапазоні електромагнітних хвиль [42, 43].

4. Для оцінки рівня відповідності МП вимогам, що висуваються, до послаблення зворотного розсіювання і випромінювання сигналу від наземних об'єктів, діапазонності МП, що розробляються і застосовуються, необхідне проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень щодо оцінки характеристик МП, а також щодо оцінки видимості об'єктів у результаті застосування маскувальних покриттів.

Проведений аналіз підтверджує, що тема дисертаційної роботи, яка присвячена створенню методів активного і пасивного захисту малорозмірних наземних об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону, є **актуальною**. Актуальність теми визначає необхідність вирішення **наукової задачі** зниження радіометричної помітності малорозмірних наземних рухомих об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

Радіометрична помітність – це можливість виявлення (чи не виявлення) наземного (рухомого) об’єкта з потрібною ймовірністю на означеній дальності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, результати яких знайшли відображення в дисертаційній роботі, виконано у Державному підприємстві “Конструкторське бюро “Південному” імені М.К. Янгеля” (ДП “КБ “Південне”) та на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Напрям дисертаційних досліджень тісно пов’язаний з роботами, виконаними у рамках проєкту «Гром-2» відповідно до контракту YN-KACST-13061.

Мета і завдання дослідження.

Мета дослідження: зниження ймовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об’єктів на основі застосування активних і пасивних методів і засобів захисту.

Для досягнення поставленої мети послідовно розв’язувались такі **задачі дослідження:**

1. Розроблення моделі захисту малорозмірних наземних об’єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.
2. Розроблення методики оцінки ймовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об’єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону з широкосмуговим шумовим підсвічуванням.
3. Розроблення методу активного захисту малорозмірних наземних об’єктів від пасивних радіометричних систем міліметрового діапазону.
4. Розвиток декомпозиційного методу формування радіометричних зображень малорозмірних наземних об’єктів у ближній та проміжній зонах антени пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим чи вузькосмуговим детермінованим сигналом.
5. Експериментальне підтвердження ефективності методів і засобів захисту малорозмірних наземних об’єктів від пасивно-активних радіометричних систем міліметрового діапазону.

Об'єкт дослідження: захист малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем розпізнавання міліметрового діапазону.

Предмет дослідження: методи активного та пасивного захисту, які знижують помітність малорозмірних наземних об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення та ідентифікації міліметрового діапазону.

Методи дослідження визначаються сукупністю задач, що вирішуються, і застосовують методи теорії радіотеплолокації і кореляційно-екстремальних систем навігації при створенні моделі захисту малорозмірних наземних рухомих об'єктів; положення теорії ймовірностей при отриманні співвідношень для оцінки ймовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними пасивно-активними системами виявлення міліметрового діапазону.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. *Вперше* розроблено метод вирівнювання температур радіояскравості об'єкта і фону на вході радіометричного приймача, що забезпечує зниження контрасту «наземний об'єкт – фон земної поверхні» до величини, яка не дозволяє виявити об'єкт на заданій дальності пасивною радіометричною системою виявлення.

2. *Удосконалена* модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону. Новизна моделі полягає в урахуванні впливу різних факторів на процес прийому і обробки сигналу, а також на формування зображень наземного об'єкта пасивно-активною радіометричною системою, що дозволяє знизити ймовірність виявлення об'єкта і зменшити дальність виявлення.

3. *Удосконалена* методика оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону, яка, на відміну від відомих методик, дозволяє оцінити зниження дальності виявлення матричними радіометричними системами в

пасивному режимі і в режимі з широкосмуговим шумовим підсвічуванням об'єкта, під маскувальним покриттям в площині кутів міста і азимуту.

4. *Отримав подальший розвиток* декомпозиційний метод, який відрізняється від відомих можливістю формування радіометричного зображення малорозмірного наземного об'єкта у ближній та проміжній зонах антени пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим чи вузькосмуговим детермінованим сигналом.

5. *Експериментально підтверджено* ефективність методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем міліметрового діапазону.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені теоретичні положення, математичні моделі, методи, методика складають основу для проектування і створення систем і засобів захисту малорозмірних наземних (рухомих) об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення, які функціонують в міліметровому діапазоні хвиль.

Отримані результати дозволяють обґрунтувати шляхи практичної реалізації засобів активного та пасивного захисту наземних об'єктів.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані на підприємствах промисловості і в науково-дослідних установах: на ДП “КБ “Південне” імені М.К. Янгеля”, м. Дніпро (акт від 25.10.2017 року), у Державному підприємстві “Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова” (ДП “ХКБМ”), м. Харків (акт № 1636А/ХКБМ от 24.06.2019).

На цих підприємствах реалізовані:

- модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону;
- метод вирівнювання температур радіояскравості об'єкта і фону на вході радіометричного приймача, що не дозволяє виявити об'єкт на заданій дальності з заданою ймовірністю пасивною радіометричною системою виявлення;

- методика оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону;

- декомпозиційний метод формування радіометричного зображення малорозмірного наземного об'єкта в ближній та проміжній зонах антени пасивним радіометричним датчиком та радіометричним датчиком з підсвічуванням шумовим широкосмуговим або детермінованим вузькосмуговим сигналом;

- результати експериментальної оцінки виявлення малорозмірних наземних об'єктів пасивно-активними радіометричними інформаційними датчиками міліметрового діапазону.

Особистий внесок здобувача.

У наукових статтях, опублікованих у співавторстві, автору належать наступні результати:

- оцінка ймовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів пасивно-активними радіометричними системами виявлення згідно запропонованої методики [41];

- постановка задачі, оцінка ефективності методу активного захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивних систем виявлення [77];

- постановка задачі, оцінка ефективності методу декомпозиції, який полягає у формуванні радіометричного зображення малорозмірного наземного об'єкта у ближній, проміжній та дальній зонах пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим чи вузькосмуговим детермінованим сигналом [80];

- участь у аналізі та обговоренні результатів чисельного експерименту, щодо можливості зниження помітності наземного об'єкту [106];

- проведення експериментальних досліджень, оцінка результатів вимірювань, розробка практичних рекомендацій щодо створення методів і засобів захисту малорозмірних рухомих наземних об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення ММД [33,75,80,82,96].

Апробація результатів дисертації здійснювалась на науково-практичній конференції 25 – 26 листопада 2015 року «Високоточні багатоцільові комплекси ракетного і реактивного озброєння повітряного та наземного базування», МО України, ХУПС імені Івана Кожедуба, 2015, Харків, Україна; на 12 науковій конференції ХУПС імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 13 – 14 квітня 2016 року, Харків, Україна; на 9th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, June 21 – 24, 2016, Kharkov, Ukraine; на 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5-9 September, 2016, Odessa, Ukraine; на 13 науковій конференції ХНУПС імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 12–13 квітня 2017 року, Харків, Україна; на 14 науковій конференції ХНУПС імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 11–12 квітня 2018 року, Харків, Україна; на 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 4-7 September, 2018, Odessa, Ukraine.

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертації опубліковані у 4 статтях фахових наукових журналів, які входять до переліку МОН України, та 1 статті в науковому зарубіжному виданні, включеному до наукометричних баз Scopus та Web of Science. Крім того, вони опубліковані у 3 статтях на міжнародних НТК, 2 патентах на винахід та 4 наукових публікаціях, що додатково відображають зміст дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки, три додатки, список використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 155 сторінок, у тому числі 1 Таблиця на окремій сторінці, 7 сторінок Додатків, 11 сторінок списку використаних джерел в кількості 106 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗАХИСТУ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ВІД РАДІОМЕТРИЧНИХ ПАСИВНО-АКТИВНИХ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ

1.1 Аналіз принципів побудови та особливостей функціонування сучасних та перспективних систем і засобів виявлення

1.1.1 Постановка задачі. З метою оцінювання необхідності застосування та ефективності засобів маскування малорозмірних наземних, у тому числі рухомих, об'єктів потрібно провести аналіз принципів побудови та тактико-технічних характеристик (ТТХ) систем виявлення (розвідки), які застосовуються по таких наземних об'єктах.

Зазвичай для виявлення малорозмірних наземних об'єктів застосовуються високошвидкісні, як правило, надзвукові системи та засоби, які оснащені системами виявлення (розвідки).

Під час військових конфліктів останніх десятиріч [2, 5] одночасно із активними радіолокаційними системами та комплексами (РЛС, РЛК) перевагу віддавали пасивним (радіометричним) системам розвідки. Найбільш прийнятним, з точки зору всепогодності, точності визначення координат шуканих об'єктів, просторової роздільної здатності, за умов високої швидкості оперування та відносно малих габаритно-масових та вартісних характеристик, одночасно із оптичним та інфрачервоним діапазонами, а також сантиметровим радіодіапазоном (для РЛС і РЛК), використовується міліметровий діапазон радіохвиль з довжинами хвиль $\lambda \approx 8\text{мм}$ і $\lambda \approx 3\text{мм}$, які відповідають «вікнам прозорості атмосфери».

Обґрунтування необхідності застосування до наземних об'єктів з високою точністю тієї чи іншої системи виявлення та розвідки наземних об'єктів, а також систем навігації ЛА, нерозривно пов'язане з аналізом об'єктивної обстановки, типу, характеристик та умов застосування систем виявлення.

Наземні об'єкти поділяються на нерухомі (стаціонарні) та рухомі, перші та другі можуть бути як точковими, так і займати деяку площу. Основними характеристиками наземних об'єктів є геометричні розміри (конфігурація) та міцність.

Особливістю існуючих та перспективних систем виявлення наземних об'єктів є необхідність здійснення процесу виявлення (розвідки) у будь-який час доби (удень та уночі) та в умовах обмеженої видимості, у тому числі складних метеорологічних умовах, за наявності перешкод системам виявлення, в умовах застосування на наземних об'єктах активного та пасивного захисту (маскування), на складних неоднорідних фонах земної поверхні.

Виявлення об'єкта є первісною та необхідною складовою процесу розпізнавання. Розпізнавання, згідно до прийнятої класифікації, поділяють на три етапи.

Першим етапом розпізнавання об'єкта є його виявлення, під час якого приймається рішення про наявність чи відсутність об'єкта у певних межах простору.

Після того, як об'єкт виявлено, розв'язується задача другого етапу розпізнавання – ідентифікації, тобто визначення належності об'єкта тому чи іншому класу об'єктів. Ідентифікація поділяється на загальну (грубу), точну та описову.

Третій етап розпізнавання (якщо він потрібен) являє собою технічний аналіз [16, 17].

Наприклад, виявлено рухомий об'єкт. У результаті загальної ідентифікації приймається рішення, що рухомий об'єкт – автомобіль. Під час точної ідентифікації необхідно прийняти рішення – автомобіль легковий чи вантажний, описова ідентифікація повинна дати відповідь про марку автомобіля. Технічний аналіз повинен сформулювати технічні характеристики автомобіля.

Під час розпізнавання стаціонарних великих або малих за площею об'єктів, зовнішній вигляд і координати яких відомі з великою точністю, задача виявлення не розв'язується, а відбувається її заміна на задачу ідентифікації.

Рухомі наземні об'єкти (цілі), які не прив'язані до координат місцевості можуть оперативнo змінювати своє місцеположення, а отже їх координати наперед невідомі. Першорядною задачею, що розв'язується у процесі розпізнавання малорозмірних об'єктів, є виявлення об'єкта на складному фоні земної поверхні або ж селекція об'єктів за ступенем важливості.

Нижче наведені узагальнені дані за матеріалами зарубіжних наукових публікацій про системи та засоби виявлення, які діють на різній дальності, із зазначенням номенклатури об'єктів, що підлягають виявленню, та типів систем виявлення.

Системи виявлення та наведення високоточної зброї можуть бути як неавтономні, так і автономні. До перших належать системи, в яких виявлення об'єктів та первісне наведення засобу ураження виконує людина – оператор. Це системи «прямої» оптичної і (або) радіовидимості і, як наслідок, малої дальності дії. Прикладом таких систем є головки самонаведення керованих ракет класу «Повітря-Земля» «Хелфайєр» і «Мейверік» різних модифікацій з наведенням за лазерним променем або з тепловізійною (інфрачервоною) головкою самонаведення [5].

Високий рівень автономності мають системи виявлення та наведення зброї, які не мають участі оператора у процесі наведення засобу ураження на об'єкт (ціль). Прикладом систем з високим рівнем автономності є комбінована активно-пасивна система виявлення і наведення 3-х міліметрового діапазону ракети «УОСП».

Система ракети «УОСП» працює у двох режимах: пошук та виявлення наземної військової техніки радіолокаційним (РЛК) датчиком 3 мм діапазону хвиль, захват і супроводження об'єкта-цілі у пасивному радіометричному режимі [6].

Пошук наземного об'єкта здійснюється шляхом сканування антени РЛК по азимуту у секторі кутів $\pm 45^\circ$ при сталому куті місця 45° . Для забезпечення розпізнавання цілей у бортовому спецобчислювачі ракети реалізована низка алгоритмів з використанням доплерівської селекції рухомих об'єктів-цілей, а також методів дискримінації за такими параметрами як потужність відбитого сигналу, коефіцієнт відбиття типових цілей, градієнт фронту відбитого сигналу та відносна дальність. Подібна група параметрів утворює в комплексі сигнатуру кожної цілі, які виділяються цифровим процесором з прийнятого РЛК сигналу. Розпізнавання у бортовому процесорі зводиться до зіставлення сигнатури виявленої цілі з типовими сигнатурами, що закладені у цифровій формі у блок пам'яті процесору, з визначенням величини функції кореляції. Коли ціль виявлено та розпізнано, сканування антени визначення припиняється і вона переключається на захват та супровід у пасивному РМ режимі автокореляційним методом, що досягається шляхом послідовного зіставлення поточних зображень об'єкта із визначенням автокореляційної функції. Висока точність визначення координат цілей і висока ступінь їх ідентифікації в системі «УОСП» досягається завдяки застосуванню кореляційно-екстремального методу порівняння зображень об'єктів, що підлягають розпізнаванню. Реалізація цього методу стала можливою внаслідок використання еталонних зображень (набору типових сигнатур) різних наземних об'єктів (автомобілі, танки, самохідні артилерійські установки, бойові машини піхоти). Ці еталонні зображення були отримані для спеціально розроблених алгоритмів розпізнавання вказаних об'єктів у результаті довгострокових досліджень на різних фонах земної поверхні (лісистій, рівнинній, пустинній та інших), у різних природно-кліматичних умовах, а також у різну пору року.

Високий рівень автономності реалізовано в системах виявлення та наведення керованої зброї відносно великої дальності польоту, а саме: в ракеті середньої дальності «Першинг-2» [7 – 9], у крилатій ракеті «ТОМАХОК» [11 – 12], оперативно-тактичних ракетах «АТАСМС» [13] та «Іскандер» [14].

Всі перелічені керовані засоби ураження оснащені інерційною навігаційною системою та допоміжною системою виявлення та наведення, яка коректує напрямок руху на остаточній ділянці траєкторії польоту ракети.

У крилатих ракетах «ТОМАХОК» до складу основної системи також входить висотометрична система навігації по рельєфу місцевості TERCOM. Наведення крилатої ракети на кінцевій ділянці траєкторії польоту здійснюється кореляційно-екстремальною системою видимого діапазону SMAC (DJSMAC). Як альтернативна система корекції проходила випробування радіометрична кореляційно-екстремальна система 8 мм діапазону RAC (DJRAC) – площинний корелятор [10].

Як система виявлення та наведення на кінцевій ділянці траєкторії в ракетах ATACMS [13] використовується комбінована система, яка працює або у двох ділянках інфрачервоного діапазону за умови, коли початкова невизначеність місця знаходження цілі невелика, або у двох ділянках діапазонів ІЧ та ММД (радіолокаційне наведення) у разі роботи по цілях з невідомими координатами або малою ефективною поверхнею розсіювання.

На зміну ракетам середньої дальності «Першинг-2» (знята з озброєння) на озброєнні США стоять ракети «Гера» з дальністю стрільби більше 1000 км [7 – 9]. На цій ракеті, як і на «Першинг-2», застосовується система виявлення та наведення RADAG сантиметрового діапазону хвиль (робоча частота 10 ГГц – 20 ГГц), яка призначена для ураження високозахищених площинних цілей (у тому числі аеродромів противника). Система RADAG здійснює наведення по радіолокаційній карті місцевості. Принцип її роботи базується на порівнянні поточного РЛК зображення місцевості в районі наземного об'єкта – цілі з еталонним зображенням, що зберігається у пам'яті бортового обчислювача. У результаті кореляційного порівняння двох зображень визначаються значення відхилення головної частини ракети від цілі (похибки наведення), які після обробки у бортовому обчислювачі поступають у вимірювальний блок інерційної навігаційної системи для корекції траєкторії польоту головної

частини ракети. Порівняння виконується декілька разів на різних висотах у процесі наближення головної частини до цілі.

До автономних протитанкових високоточних боєприпасів можна віднести касетні боєприпаси, які використовують бойові елементи BONUS, Clasp, ACED, Smart, TGSM, SADARM, Skeet, що самостійно здійснюють наведення на ціль, та боєприпаси, які використовують бойові елементи Ephram, Art-Strix, що самостійно наводяться на ціль за допомогою систем ІЧ та ММ діапазонів.

Необхідно зазначити, що наведені у цьому огляді засоби ураження високоточної зброї в ході бойових дій можуть бути задіяні як самостійно, так і в рамках розвідувально-ударних комплексів, які оснащені засобами розвідки [10].

Ефективне використання високоточних засобів ураження багатьох типів наземних об'єктів можливе лише при своєчасному отриманні достовірної та точної інформації про них, проведенні попередньої розвідки об'єктів перед нанесенням ударів і після, з метою контролю їх результатів. Розвиток засобів високоточної зброї висуває більш жорсткі вимоги до повноти розвідувальних даних щодо об'єктів противника, тобто необхідно знати не тільки координати окремих об'єктів із складу групового, але і мати відомості щодо їх типу, захищеності від засобів ураження противника, а також мати дані щодо поверхні місцевості, на якому об'єкти знаходяться, тобто дані щодо фонові обстановки.

1.1.2 Вимоги до систем розвідки. Системи розвідки для попереднього виявлення площинного або групового наземного об'єкта – цілі, визначення конфігурації об'єкта повинні здійснювати огляд земної поверхні у широкому куті зору [16, 17].

За результатами виконаних досліджень можна зробити висновки. На приклад розглянемо процес виявлення (з подальшою ідентифікацією) рухомого групового об'єкта – цілі, наприклад танкової роти, батареї реактивної системи залпового вогню MLRS або зенітно-ракетного комплексу «Patriot» у районі зосередження або на марші.

Початкове виявлення групової цілі можна здійснювати, наприклад, за допомогою безпілотного літального апарату (БЛА), розвідку у такому випадку

можна виконувати з малих висот $H=(500-100)$ м у смузі (1000–3000) м. Після завершення процесу розпізнавання цілі, встановлення напрямку і швидкості її руху, приймається рішення на нанесення удару засобами ураження. Оцінка погодних умов, часу дії (удень, вночі), наявності перешкод оптичним і радіоелектронним системам розвідки та наведення зброї, застосування активних і пасивних засобів маскування об'єктів (цілей), дозволяє визначити клас систем виявлення і наведення.

У Табл. 1.1, у відповідності до даних роботи [17], наведені кількісні оцінки потрібної роздільної здатності засобів виявлення та розвідки, які необхідні для виявлення та ідентифікації деяких класів рухомих наземних об'єктів-цілей.

Таблиця 1.1

Вимоги забезпечення роздільної здатності, що потрібна для виявлення та класифікації наземних об'єктів-цілей

Типи цілей	Роздільна здатність, м				
	Виявлен- ня	Ідентифікація			Техніч- ний аналіз
		Загальна	Точна	Описова	
Автотранспорт (бронетехніка)	1,5	0,6	0,45	0,3	0,15
Літаки на стоянках	4,5	1,5	1	0,15	0,1
Позиції ракетних комплексів	3	1,5	0,6	0,45	0,3
Ракетно-артилерійські установки	1	0,6	0,15	0,05	0,045

У Табл. 1.2 наведені основні характеристики зарубіжних космічних радіолокаційних засобів розвідки [16], які отримали найбільш часте використання.

Основні характеристики космічних радіолокаційних засобів виявлення та розвідки

Найменування космічного апарату, країна	Частота, ГГц	Розміри смуги огляду, км			Роздільна здатність, м		
		Оглядовий	Детальний	Телескопічний	Оглядовий	Детальний	Телескопічний
1	2	3	4	5	6	7	8
«Лакрос» США	9,6	100	6...20	2...3	15	3	1
SIR-C/X-SAR NASA	1,25 5,3 9,6	90 90 40	14,4 14,4	6 1,3	200 200 30	10 10	1,8 1,6
1	2	3	4	5	6	7	8
R-2000 Франція	9,6	200	30		20	2...4	
«Осирис» Франція	10					3...5	
«Радарс» Канада	5,3	800	45		100	10	
«JERS» Японія	1,27	75			18		
ERS-1,2 Європа	5,3	100 100			30 10		
EOS-SAR Європа	1,24 5,3 9,6	500 200			500 100	30	

Аналіз характеристик наведених засобів виявлення та розвідки дозволяє стверджувати, що вимоги, і в першу чергу до роздільної здатності, достатньо легко можуть бути виконані сучасними засобами оптико-електронної розвідки (виявлення). Подібні характеристики є притаманними не тільки космічним засобам розвідки, але і системам літаків, а також наземним стаціонарним та мобільним засобам.

У зв'язку з цим потрібно провести пошук ефективних, а можливо і нетрадиційних, шляхів зниження помітності об'єктів наземної техніки.

1.1.3 Принципи функціонування автономних систем виявлення.

Автономне наведення засобів ураження високоточної зброї здійснюється за допомогою, так званих, кореляційно-екстремальних систем навігації та наведення (КЕСН) [18 – 24].

Кореляційно-екстремальна система навігації (наведення), будучи додатковою навігаційною системою, використовується для корекції помилок інерційної навігаційної системи (ІНС) [25 – 27]. КЕСН здійснює корекцію (прив'язку) траєкторії руху ЛА, як засобу виявлення, розвідки та ураження у обраних заздалегідь точках шляхом суміщення, двовимірного (тривимірного) зображення об'єкта – цілі на певному фоні, який називається поточним зображенням (ПЗ), з еталонним зображенням (ЕЗ), що зберігається у пам'яті бортового обчислювача. Результатом суміщення зображень є побудова розв'язувальної функції (РФ) шляхом обчислення міри подібності ПЗ з кожним із фрагментів ЕЗ з врахуванням можливості наявності зсуву цих зображень відносно один одного, що дозволяє визначити значення цього зсуву з умови досягання глобального екстремуму РФ. Таким чином, формується унімодальна РФ. Обчислені таким чином похибки визначення координат шуканого об'єкта використовуються для корекції похибок ІНС [24 – 26].

У залежності від типу фізичного поля, що використовується, КЕСН поділяються на радіолокаційні, оптично-електронні, радіометричні, рельєфометричні та інші. У залежності від способу формування фізичного поля,

що використовується, КЕСН можуть бути активними, пасивними та напівактивними (пасивно-активними) [27, 33 – 41].

КЕСН розробляються, як правило, у видимому, інфрачервоному діапазонах електромагнітних хвиль, а також у короткохвильовій частині радіодіапазону – в сантиметровому та міліметровому діапазонах радіохвиль.

Сучасні тенденції побудови КЕСН [27, 28] спрямовані на створення одноканальних зі скануванням і багатоканальних пасивних радіометричних систем в міліметровому діапазоні. Пасивні радіометричні КЕСН міліметрового діапазону вигідно відрізняються від активних радіолокаційних систем більш високою скритністю функціонування і відсутністю завмирань відбитого від об'єкта сигналу. Порівняно із системами видимого та інфрачервоного діапазонів РМ КЕСН міліметрового діапазону відрізняються більшою всепогодністю.

Застосування багатоканальних, так званих матричних, радіометричних КЕСН дозволяє забезпечити високу швидкість оперування систем розпізнавання та наведення зброї. До того ж розвиток сучасних технологій побудови пасивних радіометричних приймачів за схемою прямого підсилення дозволяє відносно просто реалізувати матричні РМ датчики потрібної розмірності (8×8 , 16×16 елементів і більше) [27 – 32].

Таким чином, під час вибору типу і характеристик засобів активного і пасивного захисту (маскування) наземного об'єкта необхідно оцінити рівень зниження випромінювання і перевідбиття сигналу об'єктом, який потрібно виявити і який захищено тим чи іншим засобом захисту, у всіх розглядуваних діапазонах електромагнітного спектра, що повинно завадити або ускладнити виявлення об'єкта і наведення зброї на малорозмірні наземні рухомі об'єкти.

Визначальним для оцінки ефективності засобів захисту об'єктів також є аналіз тактико-технічних вимог, що висуваються до систем виявлення і наведення зброї, основних характеристик систем, що задовольняють вказаним вимогам, а також створення і аналіз моделей, які враховують основні умови застосування систем виявлення малорозмірних наземних рухомих об'єктів.

1.2. Аналіз і обґрунтування основних тактико-технічних вимог, що висуваються до засобів захисту наземних об'єктів від радіометричних систем виявлення

Внаслідок аналізу результатів великої кількості досліджень [1, 2, 5 – 15, 24 – 32, 44 – 52] з'явилась можливість конкретизувати основні тактико-технічні вимоги (ТТВ), що висуваються до РМ систем виявлення малорозмірних наземних об'єктів.

До основних ТТВ належать такі:

1. Висока точність визначення координат об'єктів.
2. Усепогодність функціонування.
3. Висока швидкість оперування.
4. Стійкість до перешкод природного та штучного походження.

1. Величина середнє-квадратичного відхилення (СКВ) (точність взаємного визначення координат системи виявлення та наземного об'єкта, що виявляється) задається виходячи з потрібного значення величини імовірності приведення високошвидкісного ЛА (носія системи виявлення) у визначені межі простору. Величина СКВ визначається розмірами і конфігурацією об'єктів на земній поверхні, технічними характеристиками інформаційних датчиків РМ систем. Кут «поля зору» інформаційного датчика РМ системи виявлення повинен перекривати площу земної поверхні в районі, в якому передбачається знаходження шуканого (виявленого) наземного об'єкта. Датчик РМ системи повинен мати високу роздільну здатність, як у просторі, так і за параметром сигналу, що вимірюється. В останньому випадку мова йде про інтенсивність відбитого або випроміненого об'єктом сигналу.

Просторова роздільна здатність визначається (обмежена) властивостями фокусування оптичних інформаційних датчиків і квазіоптичних (радіодіапазону) антенних систем. Розрахунки показують, що оптичні матричні інформаційні датчики видимого та інфрачервоного (ІЧ) діапазонів з розмірністю РМ матриці $N_1 \times N_2 = 256 \times 256$ елементів (N_1, N_2 – кількість елементів в РМ

матриці по горизонталі та вертикалі) дозволяють забезпечити з висоти візування $H=(10...8)$ км просторову роздільну здатність порядку 10 м за умови повного кута огляду поверхні, що має значення $\varphi=16^0$. Роздільна здатність радіолокаційних, радіометричних систем міліметрового діапазону залежить від розмірів антен, роздільна здатність за дальністю у радіолокаційних систем до того ж визначається тривалістю імпульсу випромінювання. Так, антенна або радіометра діаметром $d=300$ мм на довжині хвилі $\lambda=8,6$ мм при ширині діаграми спрямованості антени (ДСА) $\theta_{0,5}=2^0$ з висоти $H=10$ км забезпечує роздільну здатність 350 м. При повному куті огляду поверхні $\varphi=16^0$ кількість елементів в одному рядку $N_1=8$, в усьому кадрі $N_1 \times N_2=64$. Розміри окремих елементів кадру змінюються прямо пропорційно висоті візування.

Системи виявлення видимого і інфрачервоного діапазонів хвиль мають високі просторову та температурну роздільну здатність як нагрітих, так і «холодних» випромінюючих об'єктів. РМ системи ММД мають суттєво меншу просторову роздільну здатність. Але побудова пасивних РМ систем у вигляді матричних систем міліметрового діапазону забезпечує необхідну кількість елементів кадру для ідентифікації площинних та малорозмірних об'єктів.

Чутливість активних радіолокаційних систем (роздільна здатність за параметром сигналу, що вимірюється) забезпечується вибором відповідного енергетичного потенціалу приладів передачі [24]. Чутливість пасивних РМ систем складає $\Delta T_{\min}=(0,01-0,1)$ К/с, що у діапазонах висот, які розглядаються, також забезпечує стійке виявлення контрастів радіояскравості об'єктів на різних фонах земної поверхні. Роздільна здатність за радіояскравістю визначає подання зображення об'єкта у вигляді зонної структури, в якому окремі зони характеризуються певними (середніми) величинами інтенсивності випромінюваного або відбитого сигналу [27] за умови, що зони не перетинаються.

Застосування матричних РМ систем дозволяє формувати поточні зображення (ПЗ) наземних об'єктів за умови забезпечення потрібної високої чутливості РМ датчиків [27 – 32].

Надати оцінку точності РМ системи виявлення можна за допомогою нерівності Рао-Крамера [53, 54] для нижньої межі дисперсії похибки, тобто для середньоквадратичної помилки оцінки положення максимуму початкового сигналу двовимірного узгодженого фільтра за координатами X і Y для вхідного зображення РМ системи кореляційно-екстремального типу. Цей вираз можна записати наступним чином:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{V}{\gamma^{1/2}} = \frac{V}{\sqrt{2qn}}, \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{V^2} = -\frac{1}{K(0,0)} \frac{\partial^2 K(x,y)}{\partial x^2} \bigg|_{y=0}^{x=0} = -\frac{1}{K(0,0)} \frac{\partial^2 K(x,y)}{\partial y^2} \bigg|_{x=0}^{y=0}$$

де V – інтервал кореляції зображення;

$K(x, y)$ – автокореляційна функція ЕЗ;

$\gamma = 2qn$;

q – відношення сигнал – шум за потужністю в елементі ПЗ;

n – кількість елементів зображення.

Вираз (1.1) також дозволяє зробити висновок, що досягнення потрібної точності виявлення та ідентифікації наземного об'єкта реально можливе лише за рахунок збільшення відношення сигнал-шум у елементі зображення, оскільки параметри V і $K(x, y)$ характеризують досліджувану ділянку місцевості та не залежать від роботи РМ системи виявлення.

У роботах [55, 56] вираз (1.1) перетворено для випадку радіометричної системи виявлення і наведення зброї, що розташована на високошвидкісному ЛА:

$$\sigma_p^2 = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \cdot \frac{\sqrt{4\pi V^2 + \Delta F^2 \Delta_a^2}}{q\alpha\Delta F}, \quad (1.2)$$

де V – швидкість руху ЛА;

ΔF – смуга фільтра нижніх частот (ФНЧ), тобто смуга РМ приймача на виході;

$\Delta_a = 2H \operatorname{tg} \frac{\theta_{0,5}^0}{2}$ – лінійна роздільна здатність антени;

$\theta_{0,5}^0$ – ширина діаграми спрямованості антени РМ системи в градусах;

α – величина, зворотна до інтервалу просторової кореляції зображення.

Величина просторового радіусу кореляції α залежить: на великих висотах від рівня неоднорідності земної поверхні, що візується, а на малих висотах від розмірів роздільних елементів об'єкта, що виявляється. На висотах, що розглядаються в цій роботі, можна вважати, що радіус кореляції порівняний з розмірами проекції діаграми спрямованості антени на земній поверхні. Залежність коефіцієнту α від висоти візування можна подати виразом:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta_a} = \left[2H \operatorname{tg} \left(\frac{\theta_{0,5}^0}{2} \right) \right]^{-1}. \quad (1.3)$$

На Рис. 1.1 наведена залежність СКВ від висоти (дальності) візування наземного об'єкта радіометричною системою виявлення, що розрахована за формулою (1.2).

Залежності на Рис. 1.1 отримані за наступних вхідних у формулі (1.2) величинах: $\tau = 0,001 \text{ с}$ ($\Delta F = 10^3 \text{ Гц}$), $\tau = 0,01 \text{ с}$ ($\Delta F = 10^2 \text{ Гц}$), $\tau = 0,1 \text{ с}$ ($\Delta F = 10 \text{ Гц}$), $\theta_{0,5}^0 = 2^\circ$ (розміри параболічної антени $d = 300 \text{ мм}$ на довжині хвилі $\lambda = 8,6 \text{ мм}$), $V = 300 \text{ м/с}$. Відношення сигнал-шум у зображенні для верхньої, середньої та нижньої кривих, відповідно дорівнює $q = 1$, $q = 5$ та $q = 10$. У Табл. 1.3 наведені данні для СКВ (σ) за різних висот візування об'єкта РМ системою виявлення ММД.

Жирним шрифтом у Табл. 1.3 позначені границі припустимих значень СКВ для виявлення РМ системою при різних відношеннях сигнал-шум у зображенні.

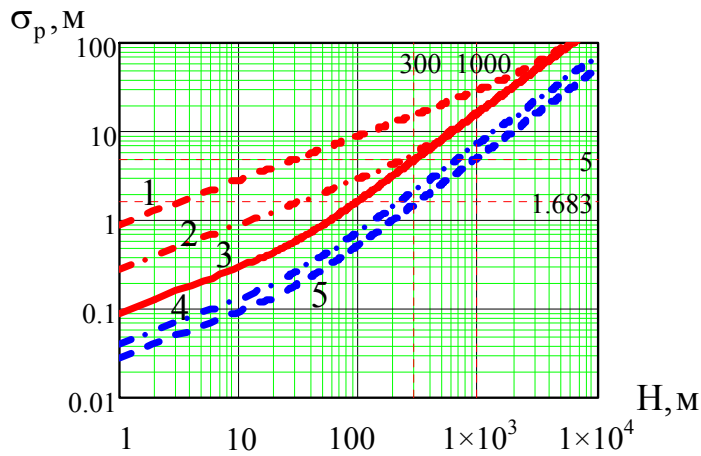


Рис. 1.1. Залежність $\sigma = f(H)$. Лінія 1 – $\tau = 0,001$ с, $q = 1$; 2 – $\tau = 0,001$ с, $q = 5$; 3 – $\tau = 0,01$ с, $q = 5$; 4 – $\tau = 0,1$ с, $q = 1$; 5 – $\tau = 0,1$ с, $q = 10$.

Таким чином, можна зробити висновок, що точність і достовірність визначення місцезнаходження наземного об'єкта можуть бути поліпшені, в першу чергу, за рахунок збільшення відношення сигнал-шум на виході радіометра, що визначає відношення сигнал-шум, як в елементі, так і в кадрі отриманого зображення. Результати розрахунків за формулою (1.2) показують, що за допомогою РМ систем можуть бути забезпечені досить високі значення граничних величин точності виявлення (розвідки). Реальні величини точності виявлення матричними РМ системами, як показують результати попередніх розрахунків [25 – 27], також складають одиниці – десятки метрів.

Збільшення часу інтегрування (накопичення) РМ приймача до величин $\tau = (0,1)$ с знижує величину точності до неприйнятних значень $\sigma_p = (10-20)$ м. Це відбувається внаслідок того, що час візування (τ) надто великий для цих висот за умови високої швидкості польоту ($V = 300$ м/с). За умови зниження часу інтегрування на порядок ($\tau = (0,01)$ с) величина СКВ для застосувань, що розглядаються, має прийнятні значення $\sigma_p \leq 2$ м.

Значення СКВ РМ системи виявлення по висотам

Висота візування, м	СКВ, м (q=1)	СКВ, м (q=5)	СКВ, м (q=10)
5000	82,244	36,78	26,008
1000	16,351	7,313	5,171
750	12,373	5,533	3,913
500	8,253	3,691	2,61
100	1,683	0,753	0,532

2. Під всепогодністю роботи РМ системи мається на увазі надійність функціонування системи в несприятливих погодно-кліматичних умовах, вдень і вночі, в димах і пилових утвореннях [27]. У зв'язку з тим, що згасання електромагнітних хвиль в атмосфері зростає зі зменшенням довжини хвилі, РМ системи радіодіапазону є більш всепогодними в порівнянні з системами видимого та ІЧ діапазонів хвиль. Як робочі діапазони хвиль в ММД використовують діапазони приблизно довжин хвиль $\lambda=8$ мм, $\lambda=3$ мм, які є «вікнами прозорості» атмосфери. ІЧ системи стійко функціонують в діапазонах з $\lambda=(3-5)$ мкм, $\lambda=(8-12)$ мкм. Системи виявлення ІЧ діапазону є системами малої дальності дії (від кількох сотень метрів до одиниць кілометрів). Пасивні РМ системи ММД у складних погодних умовах зберігають здатність до роботи при дальності дії (7-10) км. Активні радіолокаційні системи ММД здатні у тих же умовах працювати на дальності декілька десятків кілометрів [27].

3. Оцінкою швидкості роботи РМ систем є час, що відводиться на формування сигналу похибки визначення місця знаходження. Співвідношення для часу одного сеансу виявлення наземного об'єкта РМ системою має вигляд: $\tau = T_d + T_v$, де T_d – час формування ПЗ інформаційним датчиком РМ системи, T_v – час обробки поточних та еталонних зображень і обчислення величини похибки місця знаходження бортовим спецобчислювачем (у випадку побудови системи по кореляційно-екстремальному принципу).

Загальний час $m\tau$ всіх m сеансів виявлення об'єкта обмежено швидкістю руху ЛА над об'єктом. Час T_d з точки зору накопичення сигналу повинен бути як умога більшим, що особливо важливо для пасивних радіометричних систем. Для систем виявлення із горизонтальною (похилою) траєкторією польоту на високих швидкостях час T_d обмежено такими факторами: можливістю виникнення масштабних спотворень зображення у випадку зміни висоти польоту, або «змазування» зображення під час горизонтального руху ЛА на великій швидкості. Так, наприклад, у випадку горизонтального польоту зі швидкістю $V \geq 300$ м/с та візування об'єктів з висоти 10 км (за наведених вище параметрах антени 8 мм діапазону), «пляма» діаграми спрямованості антени (ДСА) на земній поверхні за час візування одного елемента кадру (одного рядку зображення) $T_1 = 0,1$ с зсунеться на 30 м. Вважається, що прийнятна величина зсуву елемента зображення не повинна перевищувати половини пікселю зображення (половини плями ДСА) [27]. При діаметрі плями ДСА 350 м, зсув на 30 м не спричинює викривлення зображення. У випадку польоту на висоті 1 км діаметр плями ДНС дорівнює 35 м, і зсув елемента зображення на 30 м є не припустимим. У такому випадку час візування одного елемента кадру потрібно зменшити до $T_1 \approx 0,01$ с. Таке обмеження часу візування висуває підвищенні вимоги до чутливості інформаційних датчиків РМ систем виявлення.

Обмеження часу візування при високій швидкості польоту ЛА передбачає обов'язкове застосування багатоканальних, тобто матричних радіометричних систем ММД. Створення матричних радіометричних інформаційних датчиків 8 мм і 3 мм діапазону в даний час можливе як за кордоном, так і на вітчизняній елементній базі [27 – 33].

Вимога забезпечення малого часу T_v нерозривно пов'язана з вибором алгоритмів обробки зображень в бортовому спецобчислювачі системи виявлення. Результати аналізу ефективності різних алгоритмів показують [27], що, так звані, ієрархічні алгоритми дозволяють суттєво підвищити швидкість

оперування РМ систем при обробці зображень великих розмірів. Вони засновані на послідовній обробці зображень менших розмірів при допустимому рівні зниження ефективності алгоритму. Аналіз результатів досліджень [27] дозволяє віддати перевагу такому різновиду ієрархічних алгоритмів, як багаторівневі алгоритми суміщення зображень.

4. Вимога забезпечення високого ступеня захисту від перешкод передбачає забезпечення енергетичної скритності роботи РМ систем, а також високої стійкості приймальних пристроїв до впливу природних і штучних перешкод. Пасивні РМ системи ІК і ММД мають більш високу скритність функціонування в порівнянні з активними радіолокаційними системами внаслідок роботи тільки «на прийом» сигналу. Забезпечення високої стійкості до перешкод різного походження широкосмугових пасивних РМ систем ММД, в першу чергу, по відношенню до потужних зосереджених у спектрі перешкод, може бути досягнуте завдяки застосуванню відомих методів компенсації і послаблення потужних вузькосмугових перешкод в межах спектра широкосмугового сигналу [25 – 27].

Незабезпечення кожної з перерахованих вимог тягне за собою зниження якості роботи РМ систем, і навіть зрив роботи системи виявлення. Однією з головних вимог, яку необхідно реалізувати в РМ системі виявлення, це точність виявлення і визначення координат об'єкта. Головною умовою досягнення високої точності є забезпечення достатньо високого значення відношення сигнал-шум на вході РМ приймача і на виході системи, тобто в РМ зображенні. Зниження цього відношення можливо за умови застосування методів зниження помітності об'єктів, тобто застосування активних і пасивних методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів, що забезпечують зниження контрасту «об'єкт – фон» нижче рівня, який є необхідним для надійної роботи радіометричної системи виявлення.

1.3 Модель виявлення малорозмірних наземних об'єктів радіометричною системою міліметрового діапазону

1.3.1. Постановка задачі. Розпізнавання об'єкта на певному фоні за допомогою бортової інформаційної системи, наприклад матричної радіометричної системи ММД, передбачає кілька етапів від виявлення об'єкта до його ідентифікації (загальної, точної). У процесі виявлення бортовою РМ системою приймається рішення про наявність чи відсутність об'єкта в певному районі, який візуалізується.

Процес виявлення з подальшою ідентифікацією малорозмірних наземних об'єктів пов'язаний з цілою низкою чинників. Радіометричні системи виявлення, що розміщуються на високошвидкісних літальних апаратах, повинні мати високу швидкість оперування при формуванні зображень – «образу» наземного об'єкта.

Внаслідок обмежень, що накладаються на розміри бортових антенних пристроїв, РМ системи міліметрового діапазону мають порівняно низьку роздільну здатність. Рівень природного випромінювання малорозмірних об'єктів усереднюється по ширині «плями» діаграми спрямованості антени на земній поверхні і є низьким у порівнянні з навколишнім фоном. Наявність в зоні огляду РМ системи декількох малорозмірних об'єктів передбачає під час виявлення об'єктів також розв'язання додаткової задачі селекції об'єктів, які відносяться до різних класів. При цьому миттєва зона огляду системи може бути досить великою. Застосування в цьому випадку РМ систем зі скануванням малоефективне, бо при цьому не можна реалізувати високу флуктуаційну чутливість радіометричних інформаційних датчиків.

Невизначеність рішення задачі виявлення полягає в тому, що об'єкт може змінювати місце розташування, використовувати засоби маскування, а на шляху поширення радіохвиль можлива наявність несприятливих погодних умов, пилових утворень, димів та таке інше.

У разі візування інформаційним датчиком РМ системи ММД малорозмірного наземного об'єкта, розміри якого порівнянні з розмірами одного пікселя зображення, мова може йти про можливість виявлення даного об'єкта з певною ймовірністю. Ідентифікувати такий об'єкт, тобто прийняти рішення про належність об'єкта до того чи іншого класу об'єктів, можливо лише на такій дальності до об'єкта, на якій його зображення стає багатоеlementним (багато піксельним) для інформаційного датчика, що застосовується у системі.

У роботах [34 – 40], а також в роботі, що була виконана за участю автора [41], показана можливість застосування широкосмугового шумового підсвічування для підвищення інформативності радіометричних систем виявлення малорозмірних наземних об'єктів.

1.3.2 Формалізований опис процесу виявлення групового об'єкта.

Приклад виявлення групового об'єкта, як показано на Рис. 1.2, здійснюється за допомогою безпілотного літального апарату (БЛА) [103]. Після виявлення здійснюється ідентифікація елементів і об'єкта в цілому, визначення напрямку і швидкості його руху.

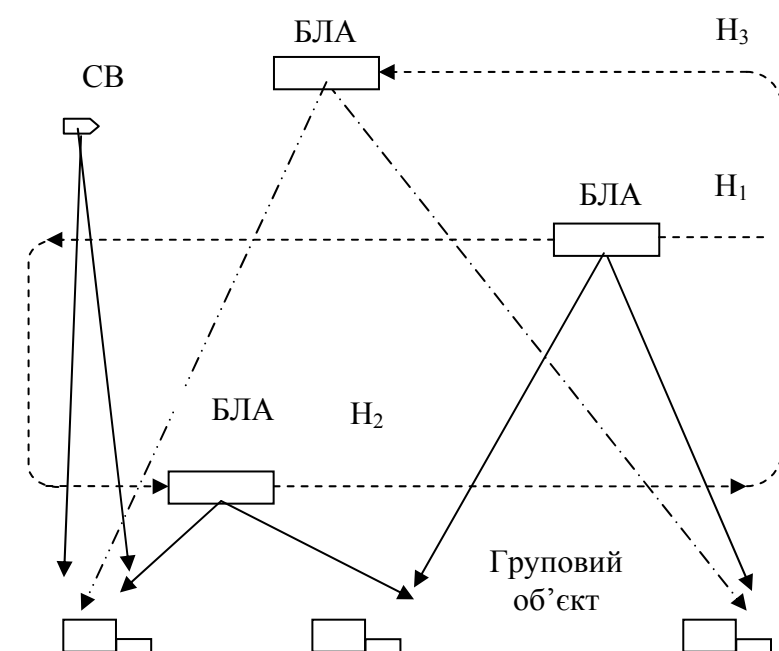


Рис. 1.2. Структурна схема виявлення групового об'єкта

1. Як груповий об'єкт розглядається колона автотранспорту на марші, що складається з певної кількості автомобілів. Колона розташована в лінію, загальна протяжність колони (500-1000) м. Швидкість руху $V \leq 60$ км.

2. На висоті $H_1 = 200$ м БЛА здійснює виявлення і грубу ідентифікацію елементів об'єкта – окремих автомобілів (вимога по просторовій роздільній здатності $\Delta r_{\text{тр}} = 1,5$ м и $\Delta r_{\text{тр}} = 0,6$ м, відповідно [16, 17]). Після цього БЛА знижується і на висоті $H_2 = 100$ м виконується точна ідентифікація групового об'єкта і його елементів (вимога по просторовій роздільній здатності $\Delta r_{\text{тр}} = 0,3$ м).

Аналіз результатів досліджень, виконаних в ході цієї роботи, показує, що в якості інформаційних датчиків на БЛА необхідно використовувати пасивні датчики видимого, інфрачервоного і міліметрового діапазонів хвиль. Пасивні інформаційні датчики мають підвищену скритність функціонування і внаслідок цього більш високу захищеність від перешкод різного походження. Радіометричні датчики ММД повинні доповнювати датчики видимого діапазону в умовах обмеженої оптичної видимості (туман, дощ, дими, пилові утворення). РМ датчики ММД мають також самостійне значення. Вони дозволяють формувати еталонні радіометричні зображення об'єктів для кореляційно-екстремальних систем виявлення, навігації і наведення.

3. Після ідентифікації групового об'єкта БЛА повинен збільшити висоту до $H_3 = (500 - 1000)$ м, звідки здійснюється супровід елементів об'єкта.

4. В наземному центрі обробки інформації здійснюється підготовка апіорної інформації про груповий об'єкт для високошвидкісних ЛА, що оснащені системами виявлення (на Рис. 1.2 – СВ) з врахуванням даних з БЛА про напрямок і швидкість руху групового об'єкта.

5. На наступному етапі здійснюється первинне виявлення наземних об'єктів бортовою СВ, що являє собою, наприклад, матричну РМ систему кореляційно-екстремального типу з інформаційним датчиком, подібним до датчика, що розміщений на БЛА.

Одним з методів підвищення дальності дії пасивних РМ систем ММД є застосування активного «підсвічування» об'єкта шумовим або детермінованим сигналом [34 – 41]. Відомі однопозиційне, двопозиційне і багатопозиційне підсвічування [41]. У разі однопозиційного підсвічування джерело підсвічування розташовується на одному носії з інформаційним датчиком РМ системи. Однопозиційне підсвічування є автономним, тобто не потребує використання додаткових носіїв для джерел підсвічування. З іншого боку використання на ЛА – носії системи виявлення джерела випромінювання знижує скритність застосування системи виявлення.

Двопозиційне підсвічування є окремим випадком багатопозиційного підсвічування. Так, підсвічування об'єкта з БЛА дозволяє забезпечити енергетичну скритність функціонування інформаційних датчиків пасивної РМ системи ММД і таким чином забезпечити високу стійкість датчиків до перешкод.

До переваг застосування на БЛА підсвічування широкопasmовим шумовим сигналом можна віднести положення з [27]. Широкопasmовий шумовий сигнал являє собою реалізацію обмеженого за спектром «білого шуму» з випадковими амплітудою і фазою. Поява стохастичного (тобто випадкового) сигналу в приймачі системи виявлення противника не дозволяє прийняти однозначне рішення про наявність корисного сигналу і розкриттю його структури. Додатковими заходами щодо приховування факту випромінювання шумового сигналу і напрямку приходу сигналу є застосування багатопозиційного підсвічування (тобто підсвічування з різних носіїв і напрямків), що дозволяє створити «ізотропне шумове поле». Разом з БЛА в якості носіїв джерел шумового сигналу можуть служити малорозмірні повітряні носії, що розташовуються в просторі рівномірно і «зависають» над груповим об'єктом, наприклад, за допомогою гальмівних парашутів.

Також можливо використовувати підсвічування об'єкта або його елементів вузькопasmовим детермінованим сигналом [27]. При цьому, для підвищення структурної скритності в приймачі інформаційного датчика РМ системи

використовується одна з гармонік сигналу підсвічування, що випромінюється з іншого носія (наприклад, з БЛА). Так, об'єкт опромінюється джерелом 3 см діапазону, а РМ приймач приймає відбитий від об'єкта сигнал на третій гармоніці у 8 мм діапазоні.

Технічні характеристики апаратури, що розміщується на БЛА (приклад):

- відеокамера із шириною зони огляду порядку $L=1000$ м з висоти $H=(500-1000)$ м;
- фокусна відстань може змінюватись із висотою з метою забезпечення потрібної роздільної здатності зображень об'єкта, що візуалізується.
- РМ інформаційний датчик 3mm діапазону – матричний датчик з решіткою (16 елементів), або матрицею випромінювачів великої розмірності $N_1 \times N_2 = 16 \times 16$ елементів;
- бортова антена параболічна або лінзова великого діаметру 1 м;
- ширина меж огляду $L=(800-1000)$ м з висоти $H=1000$ м;
- лінійний розмір окремого просторового елемента на земній поверхні $\Delta r=0,8$ м з висоти $H=200$ м та $\Delta r=0,4$ м з висоти $H=100$ м;
- джерело шумового підсвічування 3mm діапазону з рупорною антеною;
- можливо два режими підсвічування об'єкта: у першому ширина діаграми спрямованості рупорної антени $\theta_{0,5}^0=15^\circ$, що відповідає смузі підсвічування 260 м, у другому $\theta_{0,5}^0=50^\circ$ забезпечує підсвічування одночасно всіх елементів групового об'єкта, який займає ділянку на земній поверхні довжиною $L=(800-1000)$ м.

Технічні характеристики апаратури РМ системи ММД, що розташовується на ЛА:

- на ЛА з міделевим перетином до 200 мм, встановлюються оптичні (інфрачервоні) системи виявлення, або РМ система 3 мм діапазону;

– на ЛА з міделевим перетином 300 мм, встановлюються матричні РМ системи 3 мм діапазону кореляційно-екстремального типу.

Таким чином, запропоновано формалізований опис процесу виявлення із подальшою ідентифікацією малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону з підсвічуванням об'єктів широкопasmовим шумовим або вузькосmовим детермінованим сигналом. Цей опис може бути використано для моделювання процесу виявлення малорозмірних наземних об'єктів – цілей.

1.4 Аналіз відомих наукових результатів і обґрунтування напрямків досліджень в галузі розробки методів і засобів протидії пасивно-активним матричним радіометричним системам виявлення міліметрового діапазону

1.4.1 Фактори, що заважають роботі систем виявлення. Функціонування бортових РМ систем виявлення, що розміщуються на високошвидкісних ЛА, здійснюється в умовах наявності різного роду чинників, що заважають виявленню [24 – 27].

До факторів, що заважають роботі систем виявлення, слід віднести:

- відсутність стійких інформативних ознак малорозмірних наземних об'єктів і оточуючих фонів;
- несприятливі погодні умови на шляху поширення електромагнітних хвиль (хмари, дощі, тумани, дими, пилові утворення);
- наявність зовнішніх перешкод, внутрішніх шумів приймача;
- можливе маскування об'єктів навігації;
- формування і обробка зображень наземних об'єктів, що виявляються, повинна здійснюватися за малий час прольоту високошвидкісних ЛА над об'єктом.

Дослідження в галузі пасивної і активної локації, поширення радіохвиль проведені вітчизняними вченими Ніколаєвим А. Г., Перцевим С. В., Шифріним К. С., Башаріновим А. Е., Есепкиною Н. А., Колосовим М. А.,

Соколовим А. В., Андрєєвим Г. А., Потаповим А. А., Кулеміним Г. П., Разказовським В. Б. і наведені в роботах [24, 44 – 52, 54, 55].

Питанням захищеності від перешкод та стійкості по відношенню до них приймачів систем вилучення інформації, до яких відносяться РМ системи виявлення, і в першу чергу питанням стійкості широкосмугових систем по відношенню до потужних вузькосмугових перешкод, присвячено велику кількість досліджень [57 – 65]. Основні дослідження за даними питаннями проведені Харкевичем О. О., Папалексі Н. Д., Зюко А. Г., Фалько А. І., Іощенко А. Н., Палієм А. І., Фоміним А. Ф., Шаблінським А. С..

Зокрема відомі методи компенсації (вирізання) потужної вузькосмугової перешкоди в спектрі широкосмугового сигналу, наведені в роботах [57, 61, 62, 64]. Методи боротьби з внутрішніми шумами приймачів, що особливо важливо для радіометричних приймачів ММД, докладно представлені в роботах по основах радіометрії [44, 45, 52].

У роботах [25 – 27] наведені схемо-технічні рішення, що реалізують метод компенсації вузькосмугової перешкоди у всій смузі прийому радіометричного датчика.

Питанням забезпечення високої швидкості оперування РМ систем радіобачення, до яких відносяться системи виявлення, завдяки використанню перешкодостійких алгоритмів обробки зображень з великою швидкістю виконання, присвячені роботи Макаренко Б. І., Антюфеева В. І., Султанова А. С. [66 – 69].

У апаратному плані високу швидкість оперування забезпечують багатоканальні, так звані, матричні РМ системи ММД. Практичну реалізацію матричних радіометричних датчиків здійснили київські та харківські вчені Радзіховський В. Н., Горишняк В. Н., Кузьмін С. Є., Шевчук Б. М., Муськін Ю. М., Бережний В. О., Мележик П. М., Комяк В. А., Сидоренко Ю. Б., Шило С. Ю. [29 – 32, 70 – 73].

1.4.2 Принципи побудови матричних радіометричних приймачів ММД. У відомих роботах [24 – 33], а також в підрозділі 1.1 наведені приклади

побудови радіометричних систем зі скануванням і багатоканальних для огляду земної поверхні, які застосовувалися для навігації ЛА, виявлення і розпізнавання наземних об'єктів: РМ система RAC зі скануванням для навігації літаків і крилатих ракет, чотирьох променева система MICRAD і семі променева система огляду земної поверхні. Всі перелічені системи були прототипом багатоканальних систем, в яких зображення формувалось або завдяки скануванню в двох площинах, або за рахунок отримання окремого рядка зображення в одній площині з подальшим створенням кадру зображення за рахунок руху ЛА по похилій або горизонтальній траєкторії. Недоліком обох типів систем (зі скануванням та систем огляду поверхні за часом) є зменшення часу накопичення сигналу, що тягне за собою погіршення чутливості РМ приймача.

Зазначених недоліків більшою мірою позбавлені багатоканальні, так звані, матричні радіометричні системи.

Існує два методи створення матричних (багатоканальних) РМ приймачів ММД. Найбільш простим у технічній реалізації є метод побудови багатоканального РМ приймача за принципом створення матриці РМ, кількість яких дорівнює кількості парціальних ДС. Вихідна напруга кожного радіометру пропорційна радіотепловій температурі окремого елемента кадру. При цьому реалізується максимальна флуктуаційна чутливість кожного окремого каналу. У цьому випадку РМ приймачі можуть бути побудовані або за схемою прямого посилення, або за супергетеродинною схемою [24 – 33].

До недоліків даного методу побудови матричних РМ приймачів слід віднести те, що об'єднання великої кількості приймачів у матрицю веде до необхідності забезпечення ідентичності коефіцієнта підсилення радіометрів у матриці. До труднощів технічного і технологічного характеру відносяться необхідність компонування, живлення, відведення тепла і таке інше. Крім того, можливість «затінення» апертури антени матричним РМ приймачем також викликає серйозні труднощі [27].

Побудова РМ приймачів за супергетеродинною схемою в даному випадку тягне за собою необхідність синхронізації всіх гетеродинів в РМ каналах матриці або застосування загального для великої кількості каналів потужного гетеродину. До того ж «розводка» сигналів від одного потужного гетеродину передбачає поділ потужності сигналу гетеродину на всі канали в ММД, що також дуже важко реалізувати технічно.

У зв'язку з цим необхідними є врахування усіх названих факторів, а також оцінка відношення сигнал-шум на виході парціальних РМ каналів у матриці та їх чутливості. Це дозволить оптимізувати необхідну кількість каналів, що ущільнюються на один загальний приймальний РМ тракт.

Усунення зазначених недоліків, а також зменшення кількості приймальних каналів можливе завдяки використанню ущільнення каналних сигналів [25 – 27]. Ущільнення каналів РМ приймача забезпечує проходження сукупності сигналів від парціальних ДС через один загальний тракт радіометра, який виконує підсилення та перетворення сигналу. Такий підхід усуває проблему не ідентичності коефіцієнта підсилення окремих каналів.

Аналіз існуючих методів ущільнення і розділення каналів (за частотою, у часі, за формою сигналів [60]), дозволяє зробити висновок про те, що для багатоканальних РМ приймачів найбільш прийнятними є методи ущільнення сигналів у часі, а також метод лінійного ущільнення з поділом каналів за формою сигналів. У цьому випадку слід віддати перевагу застосуванню в якості ансамблю функцій модулювання сім'ї квазіортогональних функцій Уолша [66 – 69], якій притаманна властивість ортогональності та групова властивість щодо операції множення. У роботах [66, 67] проведено аналіз проходження групового сигналу через загальний тракт підсилення сигналу, отримано аналітичні вирази та здійснено оцінку вихідного відношення сигнал-шум і чутливості окремого каналу багатоканального РМ приймача супергетеродинного типу і РМ приймача прямого підсилення за умови, що присутні перешкоди від сигналів сусідніх каналів.

До недоліків багатоканальних РМ приймачів слід віднести те, що, внаслідок часткового перекриття парціальних діаграм спрямованості сусідніх променів багатопроменевої антени, має місце взаємна кореляція прийнятих за цими променями сигналів. Крім того, сигнали окремих каналів є частково корельованими внаслідок ущільнення і проходження через загальний підсилюючий тракт.

Вплив зазначених процесів кореляції наразі вивчено і представлено у роботах [25 – 27]. У цих роботах також проведена оцінка потенційної точності багатоканальних РМ систем з ущільненням каналів при наявності зазначених процесів кореляції шумових компонент сусідніх каналів.

1.4.3 Оцінка потенційної точності визначення координат наземних об'єктів простої і складної конфігурації. У роботі [27] оцінена точність визначення місця знаходження матричних систем огляду поверхні землі. При цьому використовується модель розподілу інформативного параметру, що представляє собою інтенсивність зареєстрованого датчиком геофізичного поля, у вигляді випадкового однорідного ергодичного поля. У разі візування з борта ЛА просторово розподілених об'єктів, що займають значну частину кадру зображення, ця модель стає неадекватною, і доцільно використовувати модель зображення у вигляді наземних об'єктів простої геометричної форми (ступінчастого перепаду, смуги, прямокутника) на однорідному фоні, як показано в роботі [27].

У роботі [27] методом максимальної правдоподібності розв'язана задача оцінки потенційної точності визначення координат площинних наземних об'єктів прямокутної форми за допомогою матричних РМ систем. Оцінки точності визначення невідомих координат об'єкта здійснені при наявності невідомого параметра – контрасту «об'єкт – фон».

У реальних умовах функціонування систем виявлення наземні об'єкти часто мають складну конфігурацію. Оцінка потенційної точності визначення координат таких об'єктів також проведена в роботі [27].

Доцільним є проведення експериментальних напівнатурних досліджень, спрямованих на виявлення та ідентифікацію площинних і малорозмірних наземних об'єктів за радіометричними зображеннями, які формуються радіометричним вимірювальним комплексом в міліметровому діапазоні хвиль.

Метою експериментів є підтвердження теоретичних положень про можливість розпізнавання наземних об'єктів в умовах наявності активних і пасивних засобів зниження радіометричної помітності об'єктів, в будь-яких умовах погодно-кліматичної обстановки та вдень і вночі.

1.5 Розробка практичних рекомендацій щодо застосування методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону

Метою цього розділу роботи є конкретизація результатів застосування запропонованих у роботі моделей і методів захисту малорозмірних наземних об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення, а також оцінка ефективності запропонованої методики оцінки зниження ймовірності та дальності виявлення зазначених об'єктів матричними РМ системами міліметрового діапазону.

1.5.1 Формулювання окремих задач дослідження. Виходячи з аналізу зарубіжних і вітчизняних аналогів систем виявлення наземних об'єктів з борта ЛА, аналізу відомих методів захисту наземних об'єктів від систем і засобів виявлення, розвідки і наведення зброї, можна зробити висновок про те, що **наукова задача** зниження радіометричної помітності малорозмірних наземних рухомих об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону, сьогодні повністю не розв'язана.

Для вирішення цієї наукової задачі необхідно розв'язати такі задачі:

1. Розробити модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

2. Розробити методики оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону за умови наявності широкосмугового шумового підсвічування.

3. Розробити метод активного захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивних радіометричних систем міліметрового діапазону.

4. Розвинути декомпозиційний метод формування радіометричного зображення малорозмірних наземних об'єктів у ближній і проміжній зонах антени пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим або вузькосмуговим детермінованим сигналом.

5. Експериментальне підтвердження ефективності методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем міліметрового діапазону.

Висновки до розділу 1

1. Наведений аналіз принципів побудови і функціонування систем виявлення, що розміщуються на високошвидкісних ЛА в нашій країні і за кордоном, дозволив обґрунтувати та конкретизувати основні ТТВ, що висуваються до систем виявлення і розвідки. Обґрунтовано застосування матричної радіометричної пасивно-активної системи виявлення міліметрового діапазону [25 – 41].

Обґрунтовано необхідні кількісні показники точності визначення координат наземних об'єктів за допомогою радіометричних систем виявлення ММД і ймовірності візування наземних об'єктів, а також вимоги до швидкості функціонування систем виявлення малорозмірних наземних об'єктів, що розміщуються на високошвидкісних літальних апаратах [27, 41].

Показано, що реальні величини точності виявлення матричними РМ системами [25 – 27] становлять одиниці – десятки метрів.

Проаналізовано основні ТТВ по швидкості функціонування, всепогодності, захищеності від перешкод існуючих і перспективних радіометричних систем виявлення.

2. Неможливість забезпечення будь-якої з перерахованих вимог для радіометричних систем виявлення і розвідки (точності, швидкості функціонування, всепогодності, захищеності від перешкод) тягне за собою зниження якості роботи РМ систем, і навіть зрив роботи системи виявлення. Однією з головних вимог, яку необхідно реалізувати в РМ системі виявлення, є точність виявлення об'єкта і визначення його координат. Головною умовою забезпечення такої високої точності є досягнення потрібної величини відношення «сигнал-шум» на вході РМ приймача і на виході системи, тобто в РМ зображенні. Зниження даного відношення можливе за умови застосування методів зниження помітності об'єктів, тобто застосування активних і пасивних методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів, що забезпечують зниження контрасту «об'єкт – фон» нижче рівня, який є необхідним для надійної роботи радіометричної системи виявлення.

3. Сутність і актуальність загальної наукової задачі дисертаційного дослідження полягає в зниженні радіометричної помітності малорозмірних наземних рухомих об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

4. Мета дослідження полягає у розробці активних і пасивних методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів, які дозволять знизити ймовірності і дальність виявлення об'єкта за допомогою пасивно-активних радіометричних систем міліметрового діапазону.

5. Практична значимість проведених в дисертації наукових досліджень полягає в тому, що розроблені у роботі теоретичні положення, математичні моделі, методи є основою для проектування і створення систем і засобів захисту малорозмірних наземних (рухомих) об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення, що функціонують в міліметровому діапазоні хвиль.

6. На підставі аналізу відомих наукових результатів [33, 41, 75], що був виконаний автором, обґрунтовано напрями досліджень в галузі розробки методів активного та пасивного захисту малорозмірних наземних рухомих об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону.

7. Сформульовано окремі задачі дослідження.

8. Основні положення даного розділу викладені у публікаціях автора [41, 75].

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ МАЛОРОЗМІРНИХ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ВІД РАДІОМЕТРИЧНИХ ПАСИВНО-АКТИВНИХ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ

2.1. Постановка задачі

Аналіз результатів робіт, проведених щодо захисту малорозмірних наземних об'єктів [24 – 27, 36, 37, 40 – 43], дозволяє зробити висновок про те, що оцінити комплексно можливість створення і ефективність методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів можливо з урахуванням узагальненої моделі функціонування матричної радіометричної системи виявлення міліметрового діапазону і великої кількості різнорідних чинників, що впливають на роботу таких систем.

У роботі [74] наведена модель функціонування матричної пасивно-активної радіометричної системи міліметрового діапазону, яка призначена для виявлення наземних об'єктів, а також навігації і наведення високошвидкісних літальних апаратів.

РМ система виявлення, що представлена в даних роботах, має вигляд матричної кореляційно-екстремальної системи, яка функціонує за принципом формування та обробки поточних і еталонних зображень (ПЗ і ЕЗ) наземного об'єкта на фоні земної поверхні. У зазначених роботах проаналізовано фактори, що впливають на кореляційну обробку зображень: геометричні спотворення, зміна радіотеплової температури об'єкта і фону, масштабу, зсуву і повороту зображень на деякий кут, неоднорідності нагріву обтічника антени. Але у зазначеній моделі не отримали детального аналізу фактори, які можуть суттєво погіршити або навіть зруйнувати процес формування поточних зображень і обробки ПЗ і ЕЗ, і, як наслідок, зірвати процес формування унімодальної розв'язувальної функції, а також виявлення координат екстремуму цієї функції і обчислення похибки визначення координат літального апарату. Цими факторами є різного роду перешкоди, які знижують радіотепловий контраст «об'єкт – фон земної поверхні».

Метою даного розділу є розробка узагальненої моделі захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону радіохвиль, що враховує вплив перешкод штучного характеру на процес виявлення.

2.2 Результати розробки моделі захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону хвиль

На Рис. 2.1 наведено узагальнюючу модель захисту малорозмірного наземного об'єкта від пасивно-активних систем виявлення, розроблення якої було виконано у [75] за участю автора.

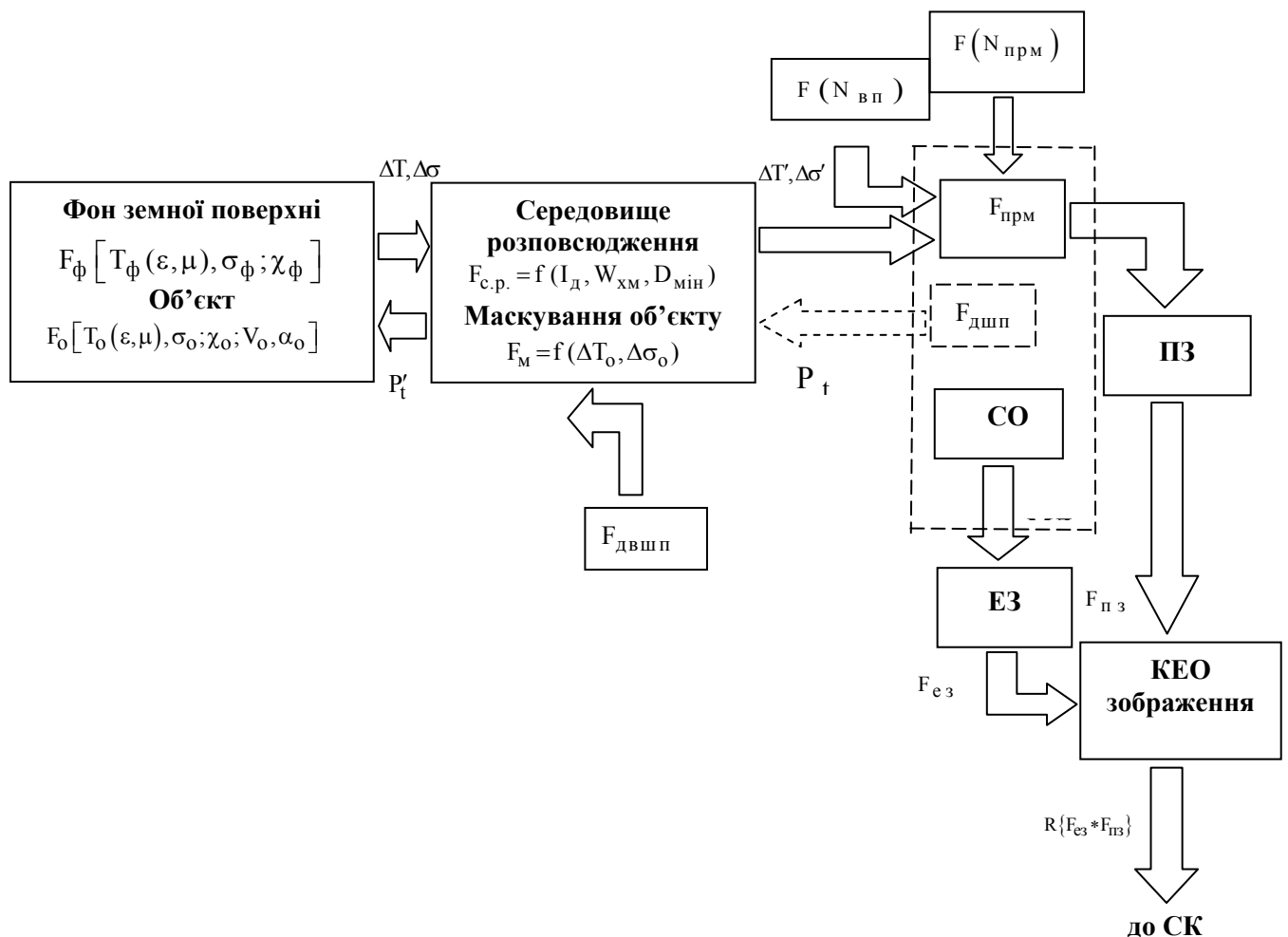


Рис. 2.1. Узагальнена модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення

Ця модель дозволяє врахувати основні фактори впливу на процес функціонування кореляційно-екстремальних РМ систем, і таким чином обґрунтувати основні методи захисту наземного об'єкта від пасивно-активних систем виявлення.

На Рис. 2.1 введено наступні позначення: $F_{\text{двшп}}$ – оператор джерела власного шумового підсвічування об'єкта, $F(N_{\text{вп}})$ – оператор вузькосмугової перешкоди, що надходить на вхід РМ приймача, $F(N_{\text{прм}})$ – оператор внутрішніх шумів РМ приймача, $F_{\text{прм}}$ – оператор РМ приймача, $F_{\text{дшп}}$ – оператор джерела шумового підсвічування РМ системи виявлення (можливе підсвічування детермінованим сигналом), $F_{\text{пз}}$ – оператор поточного зображення, $F_{\text{ез}}$ – оператор еталонного зображення, $R\{F_{\text{ез}} * F_{\text{пз}}\}$ – оператор розв'язувальної функції алгоритму суміщення зображень.

2.2.1 Формування і обробка зображень в радіометричній системі виявлення. Кореляційно-екстремальна радіометрична система виявлення функціонує за принципом формування на борту ЛА поточного зображення наземного об'єкта, порівняння поточного і еталонного зображень, побудови розв'язувальної функції зіставлення зображень, в окремому випадку взаємкореляційної функції, визначення екстремуму функції. За результатами кореляційно-екстремальної обробки (КЕО) зображень робиться висновок про знаходження об'єкта в заданій зоні простору, ідентифікації об'єкта, тобто визначення його типу (класу), і визначення взаємних координат об'єкта і ЛА.

У матричній кореляційно-екстремальній РМ системі формування поточного зображення наземного об'єкта здійснюється системою первинної обробки, так званим радіометричним датчиком (багатоелементною антеною і багатоканальним РМ приймачем), процес порівняння ПЗ і ЕЗ та обчислення розв'язувальної функції здійснює система вторинної обробки – бортовий спецобчислювач (СО).

Розглянуті умови формування та обробки зображень в РМ системі виявлення, що розміщується на високошвидкісному ЛА, можна характеризувати, відповідно до моделі (рис. 2.1), наступним чином.

Наземний об'єкт, що візується, представлений оператором $F_o[T_o(\epsilon_j, \mu_j), \sigma_o; \chi_o; V_o, \alpha_o]$, який визначається власною радіотепловою температурою об'єкта T_o , що залежить від діелектричної (ϵ_j) та магнітної (μ_j) проникностей, а також (в разі наявності активного шумового підсвічування) ефективною поверхнею розсіювання σ_o . Об'єкт також має власну випромінюючу здатність χ_o .

Об'єкт може змінювати своє місце розташування, рухатися зі швидкістю V_o під кутом азимута α_o .

Об'єкт розташований на певному, в загальному випадку неоднорідному фоні земної поверхні. Фон характеризується власною радіотепловою температурою T_ϕ , яка визначається термодинамічним станом поверхні в різних погодних умовах, що тягне за собою зміну діелектричної (ϵ_i) і магнітної (μ_i) проникностей поверхні. Фон описується оператором $F_\phi[T_\phi(\epsilon_i, \mu_i), \sigma_\phi; \chi_\phi]$.

Випромінювальна здатність об'єкта і фону змінюється від часу доби і року. Поєднання об'єкта і фону утворює радіотепловий контраст «об'єкт – фон» ΔT , а в разі підсвічування об'єкта незалежним шумовим (детермінованим) сигналом утворює різницю ЕПР $\Delta\sigma$ пари «об'єкт – фон».

Радіотепловий контраст пари «об'єкт – фон» з урахуванням мінливості погодно-кліматичних умов, внаслідок зміни електрофізичних характеристик пари, можна представити у вигляді оператора поверхні візування:

$$F'_{пв} = F_{пв} [T_o - T_\phi \pm \delta T, \sigma_o - \sigma_\phi \pm \delta\sigma, \chi_o - \chi_\phi \pm \delta\chi], \quad (2.1)$$

де $\pm\delta T, \pm\delta\sigma, \pm\delta\chi$ – зміна радіотеплового контрасту, ЕПР і випромінюючої здатності пари «об'єкт – фон» під впливом перелічених вище факторів.

Джерело широкосмугового шумового підсвічування радіометричної системи виявлення (оператор $F_{\text{дшп}}$) випромінює в сторону об'єкта шумовий сигнал з середньою потужністю P_t , який послаблюється в середовищі поширення (радіоканалі) до величини P'_t .

Середовище поширення враховано оператором $F_{\text{сп}}(I_d, W_{\text{хм}}, D_{\text{мін}})$, воно послаблює контраст радіотеплових температур «об'єкт – фон» і різницю ЕПР «об'єкт – фон» до значень $\Delta T', \Delta \sigma'$ внаслідок впливу дощу з інтенсивністю I_d , хмарності з водністю $W_{\text{хм}}$ і туману, що обмежує пряму оптичну видимість $D_{\text{мін}}$.

2.2.2 Аналіз заходів, що заважають виявленню та ідентифікації наземних об'єктів. Аналіз методів активного та пасивного захисту наземних об'єктів дозволяє зробити наступні висновки. Пасивні радіометричні системи міліметрового діапазону не сприйнятливі до пасивних перешкод (кутові та дипольні відбивачі, дими, аерозолі), інваріантні до потужних джерел лазерного випромінювання. Володіючи підвищеною скритністю функціонування внаслідок відсутності випромінювання власного сигналу, РМ системи ММД значною мірою захищені від впливу потужних джерел широкосмугового надвисокочастотного радіовипромінювання [44].

У зв'язку з цим, в якості методу захисту наземних об'єктів, що повинні знижувати якість роботи радіометричних систем виявлення ММД [44, 47], розглядаються наступні методи.

1. Активні методи захисту від РМ систем виявлення:
 - створення активної потужної вузькосмугової перешкоди (оператор $F(N_{\text{вп}})$) на вході РМ приймача системи виявлення вводить в «насичення» вхідні каскади приймача і таким чином порушує роботу РМ приймача системи виявлення;
 - вирівнювання радіотеплових температур об'єкта і фону, тобто зменшення радіотеплового контрасту «малорозмірний об'єкт – фон земної поверхні» за рахунок власного підсвічування об'єкта широкосмуговим шумовим

сигналом, що знижує ймовірність і дальність виявлення об'єкта радіометричними пасивними системами виявлення.

2. Пасивні методи захисту від РМ систем виявлення:

– застосування маскувальних покриттів (оператор F_m), що знижують величину контрасту «об'єкт – фон», тобто екранують об'єкт, що зменшує ймовірність і дальність виявлення об'єкта радіометричними пасивно-активними системами виявлення.

Оператори $F_{\text{двшп}}$ і F_m можуть бути віднесені до оператора поверхні візування $F'_{\text{пв}}$.

Взаємодія корисного РМ сигналу і шумів носить адитивний характер. До корисного РМ сигналу на вході РМ приймача додаються шуми різної фізичної природи такі, як шуми обтічника антени і навмисно створені перешкоди, і в першу чергу потужна вузькосмугова перешкода, про яку йшла мова вище і яка потрапляє в спектр широкосмугового сигналу. Вплив шумів антенного обтічника розглядався раніше в роботах [25 – 27] і в даній роботі враховується у вигляді зміни контрасту і / або ЕПР як стала складова помилки.

У РМ приймачі міліметрового діапазону домінуючими є шуми високочастотного тракту власне приймача.

Оператор впливу потужної вузькосмугової перешкоди повинен бути також віднесений до оператора приймача $N_{\text{прм}}$, оскільки саме на властивості останнього впливає цей сигнал.

2.2.3 Формування поточних і еталонних зображень, формування розв'язувальної функції радіометричною системою виявлення. Багатоканальний (матричний) радіометричний датчик і спецобчислювач РМ системи виявлення здійснюють прийом і обробку радіометричного сигналу, що надходить з виходу антени $F_{\text{прм}}(\Delta T'_a, \Delta \sigma'_a)$, і формують двовимірне поточне радіометричне зображення.

На якість поточних зображень і, в кінцевому рахунку, на якість кореляційно-екстремальної обробки суттєво впливають міждискретні

(міжпиксельні) і геометричні спотворення ПЗ $F_{\text{спт}}$, що веде до додаткового зниження корисного контрасту і різниці ЕПР. Оператор $F_{\text{спт}}$ може бути віднесений до оператора приймача $F_{\text{прм}}$.

Оператор ПЗ може бути представлений таким чином:

$$F_{\text{пз}}(\Delta T'', \Delta \sigma'') = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ F_{\text{пв}}[T_o - T_{\phi} \pm \delta T, \sigma_o - \sigma_{\phi} \pm \delta \sigma, \chi_o - \chi_{\phi} \pm \delta \chi]; \{F_{\text{двшп}}, F_{\text{м}}\} \right. \\ F_{\text{сп}}[I_{\text{д}}, W_{\text{хм}}, D_{\text{мін}}]; \\ \left. \left\{ F_{\text{прм}}[N_{\text{вп}}, N_{\text{прм}}]; \{F_{\text{спт}} \right\} \right\}. \quad (2.2)$$

Еталонне зображення характеризується оператором з неспотвореним радіометричним контрастом «об'єкт – фон» і / або неспотвореною різницею ЕПР $F_{\text{ез}}(\Delta T, \Delta \sigma)$.

Кореляційна обробка зображень зводиться до суміщення і порівняння двовимірних поточного і еталонного зображень, результатом чого є обчислення розв'язувальної функції алгоритму суміщення зображень $F_{\text{ез}}(F_{\text{пз}} * F_{\text{ез}}) = R(t, \vec{r})$, координат екстремуму ВФ і похибки визначення координат об'єкта $\delta X_o, \delta Y_o$, які поступають в систему керування (СК) рухом ЛА.

Відповідно до поданої на Рис. 2.1 моделі, вирішальна функція, яка формується кореляційно-екстремальною РМ системою виявлення, має вигляд:

$$R(t, \vec{r}) = F_{\text{ез}} \{ F_{\text{ез}}(\Delta T, \Delta \sigma) * F_{\text{пз}}(\Delta T'', \Delta \sigma'') \} = \left\{ F_{\text{ез}}(\Delta T, \Delta \sigma) * \left\{ \begin{array}{l} \left\{ F_{\text{пв}}[T_o - T_{\phi} \pm \delta T, \sigma_o - \sigma_{\phi} \pm \delta \sigma, \chi_o - \chi_{\phi} \pm \delta \chi]; \{F_{\text{двшп}}, F_{\text{м}}\} \right. \\ F_{\text{сп}}[I_{\text{д}}, W_{\text{хм}}, D_{\text{мін}}]; \\ \left. \left\{ F_{\text{прм}}[N_{\text{вп}}, N_{\text{прм}}]; \{F_{\text{спт}} \right\} \right\} \right\}. \quad (2.3)$$

Таким чином, наведено модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем виявлення. Ця модель враховує специфіку роботи кореляційно-екстремальних систем виявлення і основні чинники, що впливають на процес суміщення і зіставлення зображень і визначення координат екстремуму розв'язувальної функції, що в

кінцевому підсумку впливає на процес виявлення наземного об'єкта, а також обчислення середньоквадратичної похибки визначення взаємних координат наземного об'єкта і ЛА.

2.2.4 Рекомендації щодо зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів для пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону. Аналіз побудованої моделі дозволяє сформулювати напрямок досліджень щодо реалізації методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних систем виявлення.

Цей напрямок передбачає зниження радіотеплового контрасту і ефективної поверхні розсіювання пари «малорозмірний об'єкт – фон земної поверхні» нижче порога виявлення, що дозволить зменшити дальність виявлення об'єктів з високою наперед визначеною ймовірністю, або знизити ймовірність виявлення нижче заданої на певній дальності.

У розробленій узагальненій моделі захисту фактори, що відповідають за зниження помітності наземного об'єкта, представлені оператором джерела власного шумового підсвічування об'єкта $F_{\text{двшп}}$ і оператором маскувальних покриттів F_m . Ці фактори впливають на поверхню візування, тобто на електрофізичні характеристики пари «об'єкт – фон», що призводить до зниження радіотеплового контрасту ΔT і ЕПР пари $\Delta \sigma$.

В якості джерела власного шумового підсвічування можна обрати малогабаритне джерело (генератор) шуму міліметрового діапазону з центральною частотою $f \approx 37 \text{ ГГц}$ і смугою частот $\Delta f \approx (1-10) \text{ ГГц}$ (у 8 мм діапазоні), або генератор з аналогічною смугою частот в діапазоні хвиль ($f \approx 90 \text{ ГГц}$). За попередніми розрахунками джерело власного шумового підсвічування повинно бути розташовано на дальності близько 1 км. Це, наприклад, може бути безпілотний ЛА, що курсує на даній висоті.

У якості маскувального покриття (МП), що реалізує метод пасивного захисту наземних об'єктів, може бути використано маскувальне покриття у вигляді сітки, характеристики якого наведені в роботах [42, 43]. МП

представлено у вигляді радіопоглинаючого матеріалу, що ускладнює оптичну візуалізацію і значно послаблює природне випромінювання об'єкта в сантиметровому і міліметровому діапазонах хвиль. МП являє собою основу у вигляді сітки, яка обплетена гірляндами з просічених і скручених кольорових смужок тришарового електропровідного матеріалу. Технологічно тканину виробляють з ниток, що містять полімерний діелектричний матеріал, з обох сторін додатково покритий водостійким матеріалом. Волокна ниток містять компоненти (сажу, порошки і волокна графіту, фериту, металу і їх суміші), які поглинають електромагнітні хвилі видимого, сантиметрового і міліметрового діапазонів хвиль. За попередніми оцінками [25] застосування одношарового МП такого типу знижує контраст «об'єкт – фон» на $(5-7)$ дБ.

Вплив інших факторів, таких як мінливість радіотеплового контрасту пари «об'єкт – фон» в залежності від погодно-кліматичних умов, вплив середовища поширення, вплив власних шумів радіометричного приймача, міждискретні та геометричні спотворення поточних радіометричних зображень, враховано в роботі [27], де наведені методи корекції зазначених спотворень. Врахування впливу перерахованих негативних факторів здійснюється в зазначеній роботі як на апаратному рівні (завдяки вибору типу інформаційних датчиків та умов візування об'єкта на певному фоні), так і на програмно-алгоритмічному рівні завдяки вибору оптимальних, стійких до перешкод алгоритмів відновлення і обробки зображень в бортовому обчислювачі з визначеною високою швидкістю оперування.

У роботі [27] аналізується також вплив потужної вузькосмугової перешкоди на вхідні каскади радіометричного приймача міліметрового діапазону та запропоновано метод її компенсації на вході РМ приймача. З цією метою наведено схему послаблення ефекту, який вносять перешкоди на вході РМ приймача, і схему автокомпенсатору перешкоди в тракті проміжної частоти. Тому в даній роботі вплив потужної вузькосмугової перешкоди на стійку роботу РМ приймача розглядатися не буде.

Висновки до розділу 2

1. Удосконалено модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

У рамках запропонованої моделі вперше визначені фізичні механізми впливу різних факторів на процес приймання та обробки сигналу, а також на формування зображення наземного об'єкта пасивно-активною радіометричною системою, що дозволяє знизити ймовірність і зменшити дальність виявлення об'єкта.

У моделі запропоновані і проаналізовані:

- метод активного захисту малорозмірних наземних об'єктів, який полягає в вирівнюванні радіотеплових температур об'єкта і фону, що веде до зниження радіотеплового контрасту «малорозмірний об'єкт – фон земної поверхні» за рахунок власного підсвічування об'єкта широкопуговим шумовим сигналом;

- метод пасивного захисту від радіометричних систем виявлення, який полягає у застосуванні маскувального покриття, що також знижує контраст «об'єкт – фон» нижче порога, що веде до екранування об'єкта.

Застосування вказаних методів повинно знизити ймовірність і зменшити дальність виявлення малорозмірних наземних об'єктів радіометричними пасивно-активними системами виявлення міліметрового діапазону [41, 74, 75, 77].

2. Запропонована модель дозволяє визначити шляхи розвитку і удосконалення методів і засобів захисту малорозмірних наземних рухомих об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем міліметрового діапазону.

3. Достовірність приведених результатів обґрунтована тим, що розроблена модель не суперечить аналогічним дослідженням, отриманим іншими авторами [74].

4. Основні положення даного розділу викладені у публікації автора [41, 75, 77].

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ІМОВІРНОСТІ ТА ДАЛЬНОСТІ
ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ
МАТРИЧНИМИ
РАДІОМЕТРИЧНИМИ ПАСИВНО-АКТИВНИМИ СИСТЕМАМИ

3.1 Розробка методики оцінки імовірності та дальності виявлення

На підставі розробленої моделі виявлення малорозмірних рухомих наземних об'єктів, що наведена в підрозділі 1.2 і в роботі [75], а також положень роботи [15], було визнано за доцільне оцінити імовірність і дальність виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами виявлення ММД з широкосмуговим шумовим підсвічуванням на великій дальності (порядку декількох кілометрів), а також оцінити ефективність зниження помітності об'єктів за рахунок застосування маскувальних покриттів, тобто засобів зниження помітності.

Дані оцінки отримані автором відповідно до рішення однієї з задач, що були сформульовані в першому розділі дисертації і в роботі [41].

В якості засобу примусового маскування (захисту) наземного об'єкта розглядається застосування маскувального покриття (МП), характеристики якого наведені в роботі [43], що виконана за участю колективу співробітників ДП «ХКБМ ім. А.А. Морозова» [42].

МП у вигляді радіопоглинаючого матеріалу на основі сітки забезпечує поглинання електромагнітних хвиль видимого, сантиметрового і міліметрового діапазонів. При цьому застосування одношарового покриття веде до зниження коефіцієнта випромінювання об'єкта в міліметровому діапазоні ($\lambda \approx 8\text{ мм}$) в 3,47 рази, тобто на 5,4 дБ [25 – 27]. Застосування двошарового МП, як показали експериментальні дослідження [27], послаблює випромінювання не менше ніж в 10 разів.

Застосування такого покриття, на думку авторів роботи [43], створює суттєві перешкоди для отримання цілісного зображення наземних об'єктів інформаційними датчиками матричних РМ систем.

3.1.1 Постановка задачі. Високошвидкісний літальний апарат (надзвуковий літак, ракета, БЛА) рухається, в загальному випадку, по похилій траєкторії, в діапазоні висот $H=(1-3)$ км. Матрична радіометрична система виявлення міліметрового діапазону, зокрема кореляційно-екстремального типу, розмірністю, наприклад, $N = N_1 \times N_2 = 8 \times 8$ елементів (N_1, N_2 – кількість рядків і стовпців в зображенні, відповідно), формує кадр зображення земної поверхні, що візуються, з розташованим на ній об'єктом (об'єктами). Робочою довжиною хвилі РМ системи можуть бути обрані довжини хвиль $\lambda = 8,6$ мм, $\lambda = 3,2$ мм, які є «вікнами прозорості» атмосфери в міліметровому діапазоні. Мінімальний час формування зображення вибирається опираючись на умову реалізації необхідної чутливості РМ датчика, максимальний час – з умови відсутності ефекту «змазування» зображення внаслідок високої швидкості польоту літального апарату ($V \geq 300$ м/с). Виходячи з цих умов і технічних характеристик сучасних РМ датчиків [29 – 32], час формування зображення має дорівнювати часу інтегрування сигналу в одному РМ каналі $\tau \approx 0,1 \dots 0,01$ с.

Для простоти розглянемо випадок компонування матричної радіометричної системи радіометричними приймачами компенсаційного типу, коефіцієнт, що характеризує тип радіометричного приймача, $k=1$. Вирази для радіотеплового контрасту «об'єкт – фон» (ΔT), середньоквадратичного відхилення значення шуму (СКВ) (σ) і відношення сигнал-шум на виході РМ приймача мають вигляд:

$$\Delta T \approx (T_o - T_\phi), \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{T_w}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}}, \quad (3.2)$$

$$q = \frac{\Delta T}{\sigma}, \quad (3.3)$$

де T_o – радіотеплова температура об'єкта, К ;

T_ϕ – радіотеплова температура фону, К ;

$T_{ш}$ – шумова температура РМ приймача, К ;

Δf – ширина смуги пропускання РМ приймача, Гц.

Необхідно врахувати, що в шумову температуру РМ приймача (T_n) додається температура фону. Ослаблення величини сигналу від об'єкта і фону при поширенні в атмосфері, в складних метеорологічних умовах буде враховано в наступних розділах роботи, ступінь заповнення променя ДС системи об'єктом буде врахована також під час виведення співвідношень у подальшому.

3.1.2 Отримання аналітичних виразів для оцінки імовірності виявлення малорозмірних наземних об'єктів. Основні аналітичні вирази були отримані автором в роботі [41] на підставі результатів роботи Д. Мідлтона [15], що присвячена питанням виявлення сигналу на фоні шумів. У роботах [35 – 40] проводився аналіз питання спільного прийому сигналу пасивного радіометричного каналу і шумового або детермінованого сигналу джерела активного підсвічування. У роботі [38] проведено аналіз впливу ширини смуги сигналу підсвічування наземних об'єктів на якість функціонування радіометричних інформаційних систем, уточнено аналітичний вираз для відношення сигнал – шум пасивного РМ каналу.

Відповідно до положень робіт [24 ,53, 54], на наш погляд, є доцільним провести детальний аналіз статистичного характеру виявлення малорозмірних об'єктів. У цьому випадку має місце двохальтернативне, в загальному випадку, багатоцільове виявлення (виявлення одного або декількох об'єктів) [24]. При цьому існують чотири ситуації, пов'язані з наявністю і відсутністю сигналу. Наявність сигналу характеризує наявність об'єкта, відсутність сигналу – наявність тільки фону. Для РМ приймача характерна ситуація, коли необхідно встановити фіксований поріг, перевищення якого свідчить про наявність сигналу (об'єкта).

Приймається умова, що апіорні імовірності гіпотез відсутності або наявності сигналу і матриці втрат невідомі (найбільш характерний випадок для радіолокації [24, 53]).

Такий алгоритм є оптимальним за критерієм Неймана-Пірсона [24, 53], якщо при його використанні досягається мінімальне значення похибки другого роду («пропуску цілі») для визначеного обмеження імовірності похибки першого роду («помилкової тривоги»).

Імовірності помилкової тривоги і правильного виявлення сигналу є функціоналами від щільності розподілу сигналу і фону (відсутності сигналу). Відмінність щільності розподілу для цих двох випадків зумовлена наявністю контрасту «об'єкт – фон».

Співвідношення для імовірності помилкової тривоги для одного елемента зображення F' , за умови нормального закону розподілу щільності перешкоди (випромінювання фону), в результаті ряду перетворень приймає вигляд:

$$F' = \int_{T_0 - T_\phi}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{T^2}{2\sigma^2}} dT = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{T_0 - T_\phi}{\sigma} \right) \right], \quad (3.4)$$

де $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$ – інтеграл імовірності,

T_0 – порогове значення, яке визначає наявність сигналу, тобто наявність об'єкта на фоні, що візується.

Імовірність хоча б однієї помилкової тривоги для сукупності з N елементів в РМ матриці дорівнює:

$$F = 1 - (1 - F')^N. \quad (3.5)$$

При $N \gg 1$

$$F \approx N \cdot F'. \quad (3.6)$$

Згідно до співвідношень (3.4), (3.6) вираз для порогу виявлення T_0 матричною РМ системою об'єкта має вигляд:

$$T_0 = T_\phi + \sigma \Phi^{-1}\left(1 - \frac{2 \cdot F}{N}\right), \quad (3.7)$$

де Φ^{-1} – функція зворотна до інтегралу імовірності.

Згідно до положень робіт [24, 53] і виразом (3.7) імовірність правильного виявлення для матричної радіометричної системи визначається співвідношенням:

$$D = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{T_g + \Delta T - T_0}{\sigma} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(q - \Phi^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot F}{N} \right) \right) \right]. \quad (3.8)$$

На рисунку 3.1 наведені залежності імовірності правильного виявлення від відношення сигнал – шум на виході РМ приймача, параметром в цьому випадку виступає величина імовірності помилкової тривоги F . Величина $F=10^{-4}$ для всіх елементів зображення (матриця розмірністю $N=10 \times 10=100$ елементів) відповідає досить малій величині помилкової тривоги в одному елементі $F' \approx 10^{-6}$.

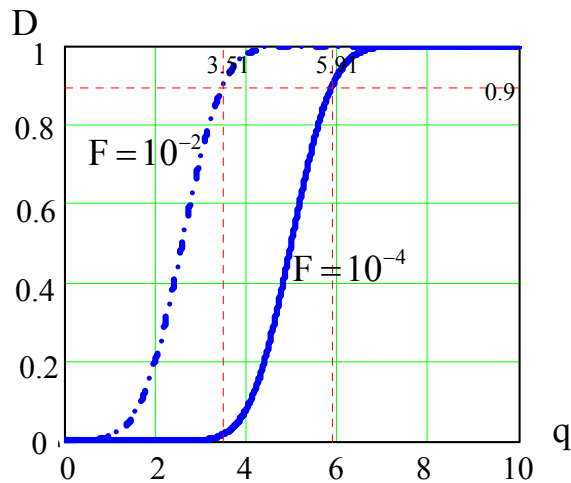


Рис. 3.1. Залежність $D=f(q)$ для різних значень імовірності помилкової тривоги.

Наведені графіки дозволяють визначити мінімально необхідне відношення сигнал – шум на виході кожного каналу РМ датчика для впевненого виявлення малорозмірного об'єкта ($D \geq 0,9$). Величина цього відношення

лежить в межах значень $q \approx 5 \dots 6$. У розглянутому в цій роботі випадку необхідно оцінити ефективність засобів захисту об'єкта, тобто можливість приховування факту наявності об'єкта в даній області простору. Критерієм такої оцінки може виступати величина імовірності пропуску цілі, тобто імовірності прийняття рішення про відсутність об'єкта в заданій зоні простору за умови його наявності ($P_{\text{пц}} = 1 - D$).

На рисунку 3.2 показана межа стійкого не виявлення об'єкта (пропуску об'єкта – цілі) радіометричною системою ММД ($D \leq 0,1, P_{\text{пц}} \rightarrow 1$). При цьому величина необхідного відношення сигнал – шум (для випадку $F = 10^{-4}$, $F' = 10^{-6}$ в одному елементі зображення) становить $q \leq 4$.

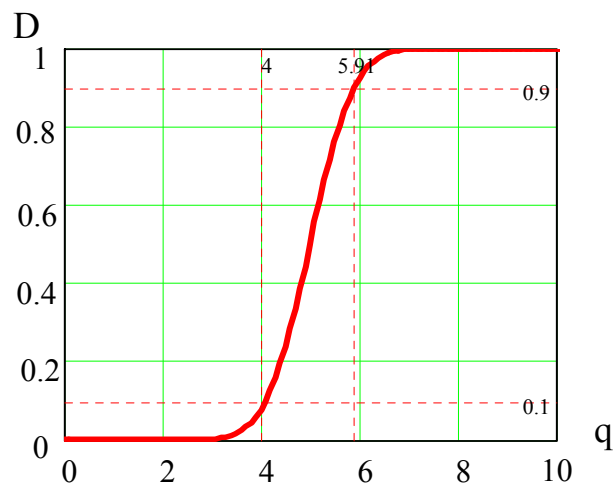


Рис. 3.2. Залежність $D=f(q)$

Таким чином, нами були отримані співвідношення для імовірності помилкової тривоги та на основі цієї імовірності отримано вираз для порога виявлення об'єкта на фоні земної поверхні.

Ці залежності дозволяють пред'явити вимоги до відношення сигнал – шум в зображеннях, які формуються у матричній РМ системі.

З урахуванням відношення сигнал – шум q , згідно виразу (3.3), при значенні СКВ шуму $\sigma = 1K$, що є прийнятним для РМ зображень високої якості,

можна сформулювати вимоги до величини радіотеплового контрасту ΔT . Так, для розглянутих в даній роботі випадків радіотепловий контраст $\Delta T \geq 5,91\text{K}$ характеризує імовірність виявлення за допомогою РМ системи на рівні $D \geq 0,9$. У той час як контраст $\Delta T \leq 4\text{K}$ характеризує імовірність правильного не виявлення цілі $D \leq 0,1$, або імовірність пропуску об'єкта – цілі $P_{\text{нц}} \geq 0,9$. Ці величини імовірності виявлення отримані для значень імовірності помилкової тривоги $F = 10^{-4}$ або $F' = 10^{-6}$ в одному елементі зображення, що є досить малою величиною, яка може бути прийнятною для реалізації процесу виявлення на практиці. Такі величини імовірності дозволяють застосувати алгоритм виявлення згідно з критерієм Неймана-Пірсона для матричних радіометричних систем.

3.2 Отримання аналітичних виразів для оцінки дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів

У цьому розділі нашою метою було отримання виразів для радіотеплового контрасту і потужності джерела підсвічування, які необхідні для сталого виявлення малорозмірних об'єктів на фоні земної поверхні з певної відстані. Це є основою для оцінки дальності виявлення при певній наперед визначеній імовірності виявлення або не виявлення (пропуску цілі) в зоні простору, що розглядається.

Відомо, що РМ приймач приймає як природне радіотеплове випромінювання об'єкта, так і відбитий від об'єкта сигнал джерела підсвічування [44, 47]. У разі візування малорозмірних наземних об'єктів умови формування сумарного контрасту мають наступні особливості.

Рівень складової за рахунок природного радіотеплового випромінювання визначається відповідно до значень коефіцієнта заповнення променя діаграми спрямованості антени (ДСА) Q :

$$\Delta T_1 = \Delta \chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R), \quad (3.9)$$

де $\Delta\chi$ – різниця випромінюючих здатностей об'єкта і фона;

T_{12} – температура, що утворює контраст, тобто різниця термодинамічної температури об'єкта і «холодного» неба;

$K(R) = \exp(-0,23 \cdot \gamma \cdot R)$ – множник, що враховує послаблення радіохвиль під час їх поширення в атмосфері;

γ – погонний коефіцієнт послаблення, дБ/км;

$R = H \cdot \sec \theta$ – нахильна дальність до об'єкта, що візується;

θ – кут нахилу лінії візування об'єкта, який відраховується від надира.

Коефіцієнт заповнення променя ДСА знаходиться зі співвідношення:

$$Q = \frac{4 \cdot S}{\pi \cdot L^2}, Q \leq 1, \quad (3.10)$$

де S – площа об'єкта, що візується;

$L = \frac{\lambda \cdot H}{d}$ – перетин ДСА площиною землі, який за умови конусної апроксимації променя ДСА і вертикальному візуванню об'єкта являє собою коло діаметром L ;

d – діаметр бортової антени.

При візуванні об'єкту під певним кутом, який визначається взаємним розташуванням об'єкту та системи виявлення, замість висоти H у виразі для L слід підставити дальність R .

Рівень складової за рахунок відбитого випромінювання джерела підсвічування визначається різницею потужностей відбитого випромінювання від об'єкта P_o і фону P_ϕ :

$$\Delta T_2 = \frac{1}{k \cdot \Delta f} \cdot (P_o - P_\phi), \quad (3.11)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·К) – стала Больцмана.

Відповідно до рівняння радіолокації і з урахуванням специфіки формування радіометричного сигналу [44, 47, 49] можна отримати розширене співвідношення для контрасту ΔT_2 . У результаті остаточний вираз для сумарного радіотеплового контрасту з урахуванням сигналу підсвічування має вигляд:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta \chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R) + \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \Delta \sigma \cdot \cos^4 \theta \cdot K(2R)}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot \Delta f \cdot R^4}, \quad (3.12)$$

де P_t – потужність джерела підсвічування;

G_t, G_r – коефіцієнт спрямованої дії антен джерела підсвічування і РМ датчика, відповідно;

$\Delta \sigma$ – різниця значень ефективних поверхонь розсіювання об'єкта і фону.

Вираз (3.12) отримано для випадку однопозиційного підсвічування наземного об'єкта. У разі двохпозиційного підсвічування необхідно замінити дальність R на дальність джерела підсвічування R_t і дальність до РМ датчика системи R_r . У разі вертикального візування РМ системою виявлення дальність до об'єкта необхідно замінити на висоту візування джерела підсвічування і висоту прийому сигналу РМ датчиком РМ системи H_t, H_r .

З рівняння (3.12) може бути отримано вираз для потужності джерела випромінювання за умови однопозиційного підсвічування наземного об'єкта:

$$P_{t1} = \frac{(4\pi)^3 [\Delta T - \Delta \chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R)] \cdot k \cdot \Delta f \cdot R^4}{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \Delta \sigma \cdot \cos^4 \theta \cdot K(2R)}. \quad (3.13)$$

У разі двопозиційного підсвічування цей вираз приймає вигляд:

$$P_{t2} = \frac{(4\pi)^3 [\Delta T - \Delta \chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R)] \cdot k \cdot \Delta f \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \Delta \sigma \cdot \cos^4 \theta \cdot K(2R)}, \quad (3.14)$$

де R_1, R_2 – похила дальність візування (за вертикального візування – висота) об'єкта джерелом підсвічування і РМ датчиком системи виявлення, відповідно.

У подальших розрахунках використовувалось таке значення співвідношення d/λ , яке забезпечує в ММД коефіцієнт спрямованої дії антени не менше 40 дБ. Це може бути практично реалізовано на довжині хвилі $\lambda=3,2$ мм за діаметру дзеркальної параболічної антени $d=200$ мм, або ж на довжині хвилі $\lambda=8,6$ мм при діаметрі антени $d=500$ мм. Коефіцієнт спрямованої дії антени $G_r=3,855 \cdot 10^4$. За цих умов ширина ДСА РМ системи становить $2\theta_{0,5}^0 \approx 1,1^0 - 1,2^0$.

У роботі [40] було проведено оцінку дальності виявлення наземних об'єктів за допомогою РМ системи ММД для різних кутів місця θ, φ («надир – бічна проекція», «надир – лобова (задня) проекція»), без урахування азимутальних кутів.

За умови рівності кутів місця ($\theta=\varphi$) вираз (3.12) модифіковано з урахуванням доповнення кутів місця θ кутами (α) в азимутальній площині.

На рисунку 3.3 наведено геометрію візування малорозмірного наземного об'єкта РМ системою виявлення.

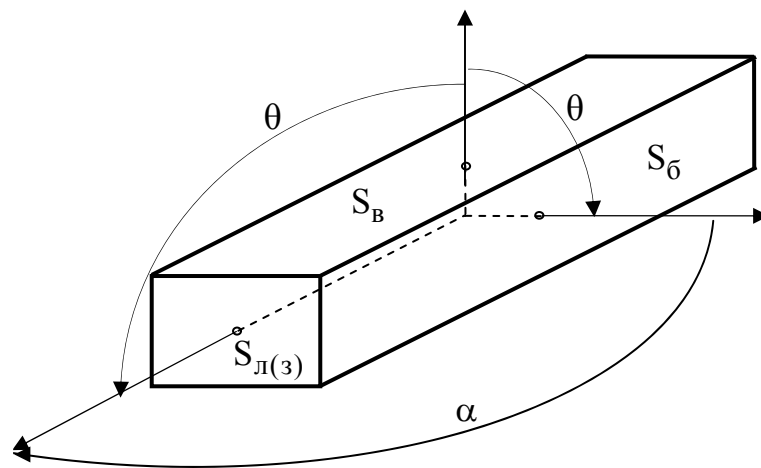


Рис. 3.3. Геометрія візування РМ системою малорозмірного наземного об'єкта

На рисунку 3.3 введені позначення: $S_v, S_b, S_{л(з)}$ – площа верхньої, бокової

і лобової (задньої) проєкцій об'єкта, θ – кут візування об'єкта в площині «надир – бічна проєкція» і «надир – лобова (задня) проєкція» об'єкта, α азимут, кут візування об'єкта в горизонтальній площині.

Вираз для площі об'єкта приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} S(\theta, \alpha) &= S_B \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha + S_G \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + S_B \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha + S_{л(3)} \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha = \\ &= 25 \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha + 17 \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + 25 \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha + 9 \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (3.15)$$

У разі використання тільки пасивного режиму роботи РМ системи виявлення без застосування незалежного штучного підсвічування вираз для радіотеплового контрасту «об'єкт – фон» і дальності виявлення пасивною радіометричною системою має вигляд:

$$\Delta T_1 = \frac{d^2 \cdot 4 \cdot S(\theta, \alpha) \cdot \Delta \chi \cdot T_{12}}{R_r^2 \cdot \pi \cdot \lambda^2}, \quad (3.16)$$

$$R_r = \frac{d}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot S(\theta, \alpha) \cdot \Delta \chi \cdot T_{12}}{\pi \cdot \Delta T_1}}. \quad (3.17)$$

Слід зауважити, що у виразах (3.16), (3.17), незважаючи на відсутність ефекту примусового підсвічування від штучного джерела електромагнітних хвиль (детермінованого або широкопasmового шумового випромінювання), має місце природне підсвічування об'єкта (з металевим покриттям), в якості якого виступає випромінювання «холодного» неба. Цей факт враховує температура T_{12} , що відповідає за утворення контрасту.

Для спрощення розрахунків прийнято, що виявлення об'єкта здійснюється в умовах «чистої» безхмарної атмосфери $K(R) = K(2R) \approx 1$.

Вираз для сумарного радіотеплового контрасту з урахуванням виразів (3.15), (3.16) запишемо в такий спосіб:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \frac{d^2 \cdot 4 \cdot S(\theta, \alpha) \cdot \Delta \chi \cdot T_{12}}{R_r^2 \cdot \pi \cdot \lambda^2} + \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \Delta \sigma \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot k \cdot \Delta f \cdot R_r^2 \cdot R_t^2}. \quad (3.18)$$

Для проведення кількісних оцінок дальності радіометричного виявлення зробимо наступні припущення. Підсвічування наземного об'єкта здійснюється незалежним джерелом шумового сигналу з повітряної платформи, що

знаходиться в стороні від ЛА – носія РМ системи виявлення ММД. Платформа баражує на певній висоті, наприклад, на висоті $H_t = 1 \text{ км}$. З цієї висоти ведеться підсвічування наземного об'єкта під певними кутами, наприклад, $\theta = \alpha = 0^0$. При довільних кутах ($\theta = \alpha \neq 0^0$) необхідно враховувати більш складну залежність різниці ЕПР об'єкта і фону ($\Delta\sigma(\theta), \Delta\sigma(\alpha)$) від кута підсвічування і кута візування РМ системи виявлення. Для цього будуть потрібні додаткові дані (розрахункові та / або експериментальні) про цю залежність для певного класу наземних об'єктів.

Прийом сигналу, що випромінюється наземним об'єктом або відбивається від нього, здійснюється на дальності R_r , яка і є дальністю виявлення об'єкта радіометричною системою виявлення.

З урахуванням наведених вище зауважень остаточний вираз для дальності виявлення об'ємного малорозмірного наземного об'єкта матричною пасивно-активною радіометричною системою міліметрового діапазону можна представити наступним чином:

$$R_r = \sqrt{\frac{d^2 \cdot 4 \cdot S(\theta, \alpha) \cdot \Delta\chi \cdot T_{12}}{\Delta T \cdot \pi \cdot \lambda^2} + \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \Delta\sigma \cdot \lambda^2 \cdot \cos^2 \theta}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot k \cdot \Delta f \cdot \Delta T \cdot H_t^2}}. \quad (3.19)$$

Таким чином, отримані основні аналітичні вирази для розрахунку радіотеплового контрасту, потужності джерела підсвічування пасивно-активної радіометричної системи виявлення при визначеній наперед імовірності виявлення і пропуску об'єкта – цілі. Ці вирази дозволяють оцінити дальність виявлення і не виявлення малорозмірних наземних (рухомих) об'єктів.

Отримані співвідношення дозволяють також оцінити вплив на імовірність і дальність виявлення наземних об'єктів засобів активного і пасивного захисту з заданими характеристиками, що знижують відношення сигнал – шум на вході приймальних пристроїв матричних радіометричних систем виявлення, і таким чином дозволяють оцінити ефективність засобів зниження помітності наземних об'єктів від радіометричних систем виявлення.

3.3 Результати оцінки імовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами

Розрахунки були проведені за формулами (3.18), (3.19) для наступних умов. За основу прийнята імовірність не виявлення (пропуску цілі), що дорівнює $D=0,1$, при відношенні сигнал – шум на вході приймача РМ системи виявлення $q=4$, тобто величиною контрасту $\Delta T=4\text{ К}$ (при СКВ у зображенні $\sigma=1\text{ К}$).

Величина різниці випромінювальної здатності об'єкта і фону для металу на фоні трави (лісу) становить $\Delta\chi=-0,9$, величина радіотеплової температури, що формує контраст, дорівнює $T_{12}=200\text{ К}$, що відповідає довідниковим даними для різниці температур випромінювання металу на фоні земної поверхні (трави, піску, глинозему, лісу) [44, 47, 52]. Зазначені величини $\Delta\chi$ і T_{12} відповідають також величині контрасту «об'єкт – ліс, трава» $T\approx 177\text{ К}$, що була отримана експериментально [27].

На рисунку 3.4 показана залежність площі об'єкта від кутів візування РМ системи (кутів місця θ і азимуту α), розраховані за формулою (3.15). Максимум $S(\theta=30^\circ, \alpha=40^\circ)=39,906\text{ м}^2$.

На рисунках 3.5 та 3.6 наведені результати розрахунків за формулами (3.18) і (3.19) залежності дальності виявлення об'ємного малорозмірного наземного об'єкта від кутів візування матричної РМ системи ММД. Криві на Рис. 3.5 відображають залежність дальності виявлення від кута місця (θ), що відраховується від надіру, при куті спостереження по азимуту ($\alpha=40^\circ$) для об'єкта без МП ($\Delta T=200\text{ К}, \Delta\sigma=10\text{ м}^2$).

Азимутальний кут ($\alpha=40^\circ$), як показують розрахунки, що були проведені виходячи з прийнятих розмірів і конфігурації об'єкта, відповідає максимальній дальності виявлення. Верхня крива на графіку – дальність виявлення об'єкта

РМ системою з підсвічуванням, що характеризується наступними параметрами: потужність джерела підсвічування $P_t=1\text{Вт}$, кут підсвічування $\theta=0^\circ$. Нижня крива відповідає дальності виявлення об'єкта в умовах відсутності маскування пасивною РМ системою, тобто за відсутності підсвічування.

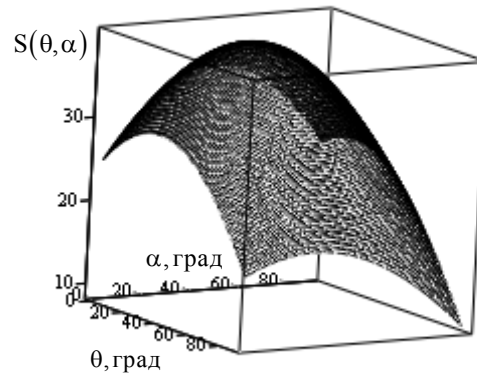


Рис. 3.4. Залежність $S=f(\theta, \alpha)$

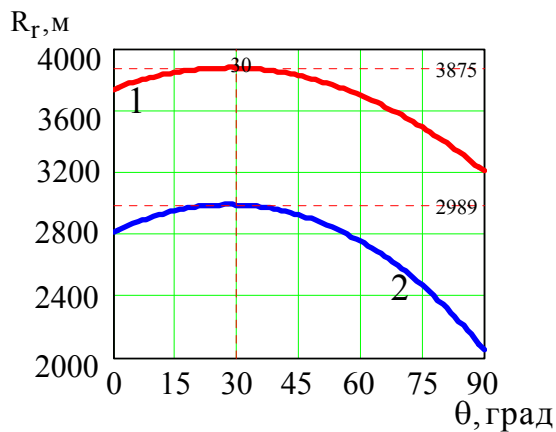


Рис. 3.5. Залежність $R_r=f(\theta)$ при $\alpha=40^\circ$, об'єкт без МП. Лінія 1 – з підсвічуванням, лінія 2 – без підсвічування.

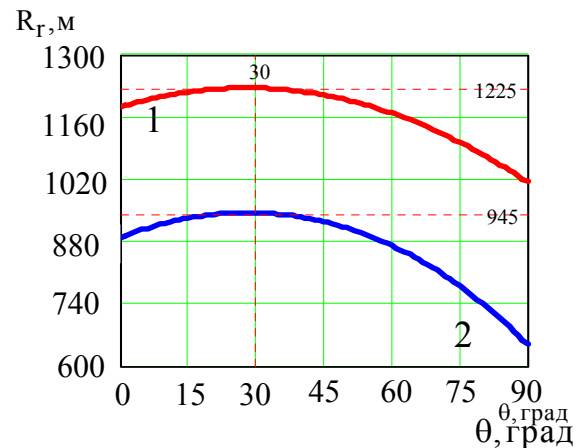


Рис. 3.6. Залежність $R_r=f(\theta)$ при $\alpha=40^\circ$, об'єкт під МП. Лінія 1 – з підсвічуванням, лінія 2 – без підсвічування.

Криві на Рис. 3.6 відповідають залежності $R_r=f(\theta)$ для об'єкта під МП ($\Delta T=20\text{К}$, $\Delta\sigma=1\text{м}^2$). Верхня крива – для випадку РМ системи з підсвічуванням об'єкта широкополосним шумовим сигналом потужності $P_t=1\text{ Вт}$, нижня – для

випадку пасивної РМ системи без підсвічування. На рисунках 3.5 та 3.6 пунктиром позначені кути місця θ , при яких, за кутів азимута $\alpha=40^\circ$, дальність виявлення за допомогою матричної РМ системи ММД є максимальною.

На рисунках 3.7 та 3.8 наведені залежності для дальності виявлення від кутів місця і азимуту, які відповідають умовам і графікам на Рис. 3.5 та Рис. 3.6.

Наведені результати (Рис. 3.5 – Рис. 3.8) отримані для випадку «не виявлення об'єкта», тобто «пропуску цілі», за умов $q \leq 4, D \leq 0,1$. Ці характеристики дальності виявлення є максимальними. При значеннях $q \geq 4$ величина імовірності правильного виявлення буде вище порога не виявлення ($D \geq 0,1$), і дальність правильного виявлення буде зменшуватися.

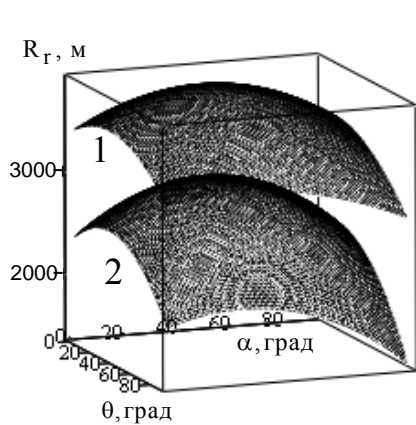


Рис. 3.7. Залежність $R_r = f(\theta, \alpha)$, об'єкт без МП. Поверхня 1 – з підсвічуванням, поверхня 2 – без підсвічування.

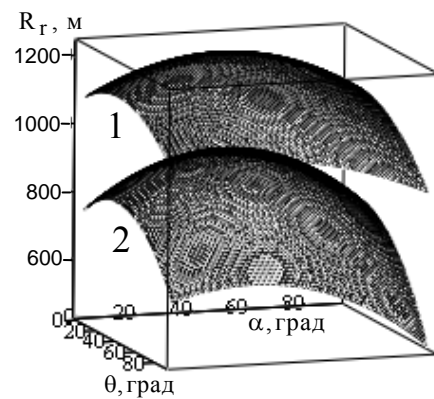


Рис. 3.8. Залежність $R_r = f(\theta, \alpha)$, об'єкт під МП. Поверхня 1 – з підсвічуванням, поверхня 2 – без підсвічування.

Результати проведених розрахунків збігаються з результатами розрахунків, виконаних у роботах [25 – 27, 40, 41], і доповнюють зазначені роботи, так як отримані формули (3.15) – (3.19) дозволяють враховувати більшу кількість факторів, а саме: потужність і багатопозиційну побудову джерела підсвічування, ширину смуги пропускання приймача РМ системи,

характеристики антени джерела підсвічування і РМ системи, що впливають на процес виявлення або не виявлення. Також вони дозволяють врахувати різні умови візування РМ системою об'єкта в ході здійснення процесу виявлення малорозмірних наземних об'єктів. Мова йде про кути візування, розміри і конфігурацію об'єкта, вплив атмосферних гідрометеорів. Отримані аналітичні вирази дозволяють оцінити вплив на процес виявлення наземних об'єктів різних методів і засобів захисту об'єкта, що можуть застосовуватись з метою підвищення скритності об'єктів, і таким чином оцінити ефективність цих засобів зниження помітності від радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

Висновки до розділу 3

1. Удосконалено методику оцінки імовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону. Запропонована методика відрізняється від відомих тим, що дозволяє оцінити зниження дальності виявлення матричними радіометричними системами в пасивному режимі і в режимі з широкосмуговим шумовим підсвічуванням об'єкта в площині кутів місця і азимута за рахунок маскувальних покриттів [41, 77, 80].

У рамках цієї методики отримані такі результати:

- вперше отримано аналітичний вираз для імовірності правильного виявлення малорозмірного наземного об'єкта при заданих значеннях імовірності помилкової тривоги, в якому враховані параметри матричної радіометричної системи виявлення [41];
- вперше отримано аналітичні вирази для радіометричного контрасту і потужності джерела випромінювання при однопозиційному і двопозиційному підсвічуванні малорозмірного наземного об'єкта з урахуванням характеристик маскувального покриття при різних кутах місця і азимуту [41, 77].

2. Результати кількісних оцінок з використанням запропонованої методики показують, що застосування на високошвидкісних ЛА матричних

радіометричних систем виявлення ММД сумісно з незалежним шумовим підсвічуванням (наприклад, з борта БЛА) дозволяє здійснювати стійке виявлення малорозмірних об'єктів (з необхідною імовірністю правильного виявлення $D \geq 0,9$) на дальності кілька кілометрів при співвідношенні сигнал – шум, що належить інтервалу значень 5 ... 6.

При цьому величина необхідної потужності широкосмугового шумового підсвічування становить десятки ват, що технічно можна реалізувати на вітчизняній елементній базі.

Застосування маскувального покриття, що екранує випромінювання об'єкта і знижує ступінь перевідбиття від наземного металізованого об'єкта на 10 дБ (тобто в 10 разів), зменшує дальність виявлення пасивною РМ системою і РМ системою виявлення з підсвічуванням широкосмуговим шумовим сигналом не менше ніж в три рази .

3. Новизна отриманих аналітичних виразів полягає в тому, що з їх допомогою можна кількісно оцінити імовірність виявлення малорозмірних об'єктів, в тому числі рухомих, за допомогою матричних радіометричних систем виявлення ММД. Об'єкти, що розглядаються, можуть бути як не захищені, так і захищені пасивними маскувальними покриттями, а також застосовувати різні кути місця і азимуту.

4. Достовірність наведених результатів обґрунтована тим, що результати розрахунку за отриманими виразами для імовірності правильного виявлення, потужності підсвічування і радіотеплового контрасту добре погоджуються з результатами аналогічних оцінок, отриманих іншими авторами для матричних радіометричних систем.

5. Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні вимог до систем та засобів пасивного захисту малорозмірних наземних рухомих об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем виявлення міліметрового діапазону.

6. Основні положення даного розділу викладені у публікаціях автора [41, 77, 80, 82, 96].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИРІВНЮВАННЯ РАДІОТЕПЛОВИХ ТЕМПЕРАТУР ОБ'ЄКТА І ФОНУ НА ВХОДІ РАДІОМЕТРИЧНОГО ПРИЙМАЧА ПАСИВНОЇ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК ДЕКОМПОЗИЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАЗЕМНОГО ОБ'ЄКТА СКЛАДНОЇ ФОРМИ

4.1 Модель захисту малорозмірного наземного об'єкта від пасивних радіометричних систем виявлення

На підставі розроблених моделей, наведених у розділах 1.3 і 2.1, було визнано за доцільне оцінити ефективність зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів за рахунок застосування активних методів захисту від РМ систем виявлення міліметрового діапазону. До таких методів належать:

- створення активної потужної вузькосмугової перешкоди (оператор $F(N_{\text{вп}})$) на Рис. 2.1 на вході РМ приймача системи виявлення вводить в «насичення» вхідні каскади приймача і тим самим порушує роботу РМ приймача системи виявлення;

- вирівнювання радіотеплових температур малорозмірного наземного об'єкта і фону земної поверхні на вході РМ приймача системи виявлення, тобто зведення до мінімуму радіотеплового контрасту «об'єкт – фон», за рахунок власного підсвічування об'єкта широкосмуговим шумовим сигналом (оператор $F_{\text{дшп}}$) на Рис. 2.1, зменшує імовірність і дальність виявлення об'єкта пасивними радіометричними системами виявлення.

Метод створення активної потужної вузькосмугової перешкоди на вході РМ приймача системи виявлення розглянуто в роботах [25 – 27]. У зазначених роботах наведені схеми пристроїв компенсації перешкоди на вході РМ приймача і в тракті перетворення частоти, наведені схеми стеження за місцеположенням

перешкоди в спектрі широкосмугового сигналу радіометра. Відзначено, що застосування схем компенсації дозволяє зменшити вплив такої перешкоди на корисний сигнал не менше ніж на $(25-30)$ дБ.

Розглянемо докладніше метод вирівнювання радіотеплових температур малорозмірного об'єкта і фону земної поверхні, запропонований у роботах [76, 77], виконаних за участю автора.

Як моделі активного захисту наземного об'єкта від пасивних РМ систем виявлення можна запропонувати наступне.

Джерело власного широкосмугового шумового підсвічування (ДВШП) знаходиться на певній висоті (дальності) над наземним об'єктом, який намагаються розвідати (виявити), наприклад на повітряній платформі. На цій же висоті, можливо на тій же повітряній платформі, знаходиться власний радіометричний датчик, що містить радіометричний приймач і антену. Тактико-технічні характеристики власного РМ датчика аналогічні характеристикам радіометричного датчика системи виявлення противника, який здійснює виявлення (розвідку місця розташування) малорозмірного наземного об'єкта. Так, якщо РМ датчик системи виявлення противника оснащений РМ приймачем, що функціонує в певному частотному діапазоні, тобто в певній смузі частот, має певну величину чутливості, а також оснащений антеною, що сканує, багатопроменевою або матричною антеною, то і власний РМ датчик, співвісний з ДВШП, також містить РМ приймач з усіма перерахованими характеристиками і оснащений антеною, що сканує, багатопроменевою або матричною антеною.

Джерело власного шумового підсвічування генерує шумовий сигнал в сторону наземного об'єкта, поступово підвищуючи потужність сигналу, опромінюючи об'єкт і фон земної поверхні до тих пір, поки власний РМ датчик не прийме сигнал, який було перевідбито наземним об'єктом, з мінімальним контрастом «об'єкт – фон».

Мінімальний контраст «об'єкт – фон» – це той поріг, перевищення якого дозволяє прийняти рішення про виявлення об'єкта в даній зоні простору з

необхідною імовірністю правильного виявлення, наприклад, з імовірністю, більшою від $D \geq 0,9$. При цьому значення порогу виявлення (або необхідний контраст), як показано у розділі 3.2, визначається нерівністю $q \geq 5,91$. Прийом сигналу від об'єкта з рівнем контрасту «об'єкт – фон», нижчий порога, не дозволяє прийняти рішення про виявлення об'єкта на фоні земної поверхні з необхідною імовірністю ($D \geq 0,9$).

Рівень імовірності правильного виявлення вибирається з умови задачі, яку було поставлено. Якщо необхідно забезпечити максимальну імовірність не виявлення об'єкта, тобто високу імовірність пропуску цілі ($P_{\text{пц}} \geq 0,9, D \leq 0,1$), при якій приймається рішення про відсутність об'єкта – цілі в даній зоні простору, при його наявності, то вибирається інший поріг виявлення, наприклад $q \leq 4$.

Може бути поставлена умова про вирівнювання радіотеплових температур об'єкта і фону, тобто про приведення контрасту «об'єкт – фон» до нульового значення $q=0, \Delta T=0$.

Виходячи із зроблених припущень, використовуючи аналітичні вирази з розділу 3.2, можна визначити дальність виявлення або не виявлення (пропуску цілі) наземного об'єкта пасивним радіометричним датчиком системи виявлення противника.

Надалі рівень сигналу порогу на вході власного РМ датчика (власного радіометричного приймача) необхідно підтримувати постійним, таким що відповідає низькому (зокрема, нульовому) рівню радіотеплового контрасту «об'єкт – фон». З цією метою здійснюється корекція рівня сигналу по лінії зворотного зв'язку від власного РМ датчика шляхом регулювання потужності джерела власного шумового підсвічування.

4.2. Розробка методу вирівнювання радіотеплових температур об'єкта і фону на вході радіометричного приймача системи виявлення

4.2.1. Постановка задачі. У відповідності до виразів (3.9) – (3.11), отриманими в розділі 3.2, а також відповідно до виразу (3.12), вираз для

сумарного радіотеплового контрасту має вигляд:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta\chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R) + \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \Delta\sigma \cdot \cos^4 \theta \cdot K(2R)}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot \Delta f \cdot R^4}. \quad (4.1)$$

Сумарний контраст (4.1) складається з двох частин: пасивної радіометричної ΔT_1 складової і активної радіолокаційної ΔT_2 .

Пасивна радіометрична складова являє собою добуток таких компонент: різниці коефіцієнтів випромінювання об'єкта і фону $\Delta\chi$, різниці термодинамічної температури і температури підсвічування неба T_{12} , яка утворює контраст, коефіцієнта послаблення радіохвиль ММД у приземній атмосфері $K(R)$. Коефіцієнт Q – характеризує частку площі, що займає об'єкт в площі проекції діаграми спрямованості антени на земну поверхню, $Q \leq 1$. Внаслідок того, що коефіцієнт випромінювання наземного об'єкта з металевим покриттям малий $\chi \leq 0,1$, у порівнянні з коефіцієнтом випромінювання фону земної поверхні $\chi \geq 0,8-0,9$, радіометричний контраст ΔT_1 є негативною величиною.

Активна радіолокаційна складова являє собою радіотепловий контраст об'єкта і фону, отриманий з основного рівняння дальності радіолокації [24, 54], і залежить від потужності джерела підсвічування, висоти (дальності) і від певних значень інших величин, що входять у рівняння дальності радіолокаційного виявлення (ефективної поверхні розсіювання об'єкта і фону, параметрів антен, передавача і приймача, послаблення випромінювання в атмосфері).

Активна складова є величиною позитивною і при певній величині потужності джерела шумового підсвічування на певній висоті може зрівнятися за величиною з пасивною складовою ($|\Delta T_1| = |\Delta T_2|$), що веде до зниження величини сумарного радіотеплового контрасту «об'єкт – фон», в ідеальному випадку до нуля ($\Delta T \rightarrow 0$).

4.2.2. Результати оцінки ступеня зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів за рахунок застосування власного шумового підсвічування. Наведемо результати розрахунків величини контрасту від дальності виявлення при різних співвідношеннях величин, що входять у вираз (4.1). Але спочатку вираз (4.1) перетворимо до вигляду:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \frac{d^2 \cdot 4 \cdot S(\theta, \alpha) \cdot \Delta \chi \cdot T_{12} \cdot K(R)}{R_r^2 \cdot \pi \cdot \lambda^2} + \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \Delta \sigma \cdot \lambda^2 \cdot K(2R)}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot k \cdot \Delta f \cdot R_r^2 \cdot R_t^2}. \quad (4.2)$$

У формулі (4.2) наведено вираз для площі об'єкта $S(\theta, \alpha)$ в залежності від кутів візування системи виявлення по куту місця θ і азимуту α [77]:

$$\begin{aligned} S(\theta, \alpha) &= S_B \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha + S_6 \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + \\ &+ S_B \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha + S_{л(3)} \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha = \\ &= 25 \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha + 17 \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + \\ &+ 25 \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha + 9 \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (4.3)$$

У виразі (4.3) введені позначення: $S_B, S_6, S_{л(3)}$ – площі, відповідно, верхньої, бічної і лобової (задньої) поверхні наземного об'єкта, який намагаються виявити (позначення введені таким же чином, як і в розділі 3.2).

Як приклад розглянемо випадок виявлення наземного об'єкта з верхньої півсфери.

На Рис. 4.1 наведено як приклад результати розрахунку величини контрасту від дальності виявлення $\Delta T = f(R)$ для випадку візування малорозмірного наземного об'єкта радіометричною системою виявлення з верхньої півсфери під кутами місця і азимуту, які дорівнюють нулю ($\theta = \alpha = 0^0$). Площа верхньої поверхні (проекції) об'єкта $S_B = 25 \text{ м}^2$.

Розрахунки проведені для значень фізичних величин, що входять до складу формули (4.2): різниця коефіцієнта випромінювання об'єкта і фону $\Delta \chi = -0,9$, величина температури $T_{12} = 200 \text{ К}$, що утворює контраст «об'єкт – фон».

Коефіцієнт спрямованої дії (КСД) антени джерела підсвічування G_t вибирається таким чином, щоб джерело підсвічування опромінювало всю сцену «об'єкт і фон». Мова може йти, наприклад, про рупорну антену з $G_t = 173$. КСД антени РМ приймача $G_r \approx 10^4$, що характерно для параболічної антени діаметру $d = 200$ мм на довжині хвилі $\lambda = 3,2$ мм [88 – 90]. Різниця ЕПР об'єкта з металевим покриттям та фону земної поверхні обрано у вигляді $\Delta\sigma = 10$ м², смуга пропускання РМ приймача $\Delta f = 10^9$ Гц. Підсвічування здійснюється з висоти $H_t = 1000$ м, під кутами місця і азимуту $\theta = \alpha = 0^\circ$.

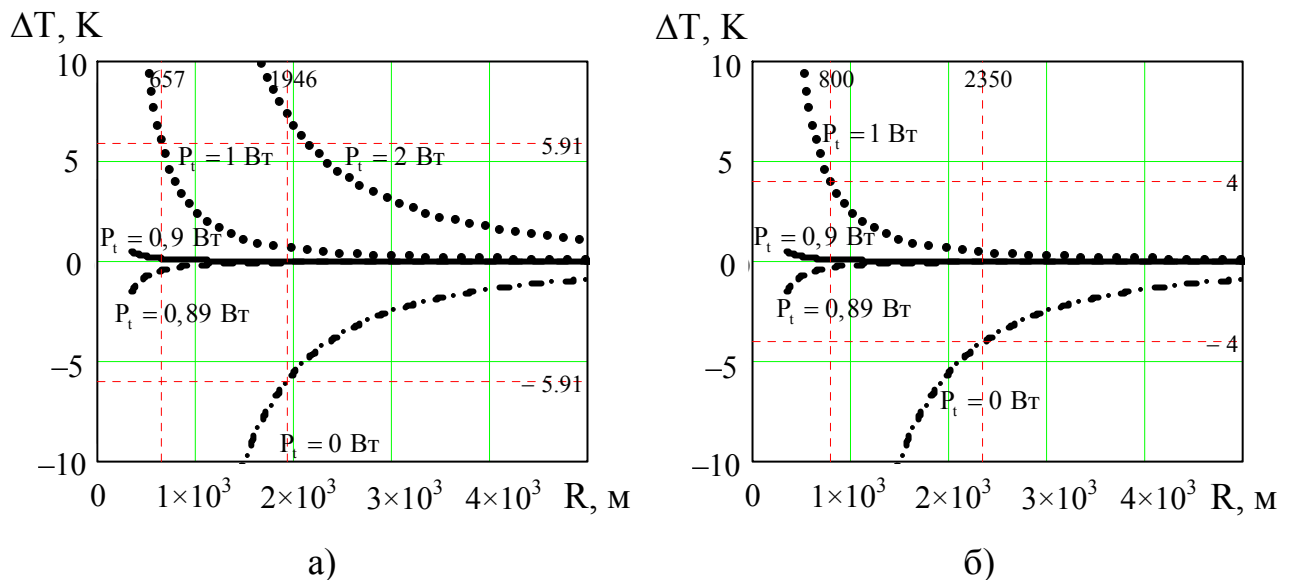


Рис. 4.1. Залежність $\Delta T = f(R)$ для випадку візування наземного об'єкта з верхньої напівсфери за таких умов: а) $D \geq 0,9$, б) $D \leq 0,1$

На рисунку 4.1,а нижня штрих пунктирна крива відповідає залежності величини радіотеплового контрасту від дальності виявлення для пасивної РМ системи, тобто характеризує пасивну складову у виразі (4.2) ΔT_1 . При цьому дальність виявлення об'єкта пасивною РМ системою з імовірністю $D \geq 0,9$ ($q = 5,91$, $\Delta T = 5,91$ К) становить величину $R \leq 1946$ м.

За потужності підсвічування $P_t \geq 1$ Вт активна радіолокаційна складова ΔT_2 перевищує пасивну радіометричну ΔT_1 , у цьому випадку дальність виявлення становить величину $R \geq 650$ м за умови $P_t \geq 1$ Вт, і величину $R \geq 2150$ м за умови $P_t \geq 2$ Вт.

На рисунку 4.1,б наведені такі ж криві для випадку малого значення імовірності виявлення об'єкта $D \leq 0,1$. При цьому поріг виявлення складає величину ($q \leq 4, \Delta T \leq 4$ К). Дальність виявлення з такою імовірністю при визначеному значенні порогу для пасивних РМ систем становить $R \leq 2350$ м, для РМ системи з підсвічуванням потужністю $P_t \geq 1$ Вт $R \leq 800$ м.

На рисунку 4.2 показана залежність $\Delta T = f(R)$ для малого рівня граничного контрасту ($q \leq 1, \Delta T \leq 1$ К), тобто для $D \rightarrow 0$.

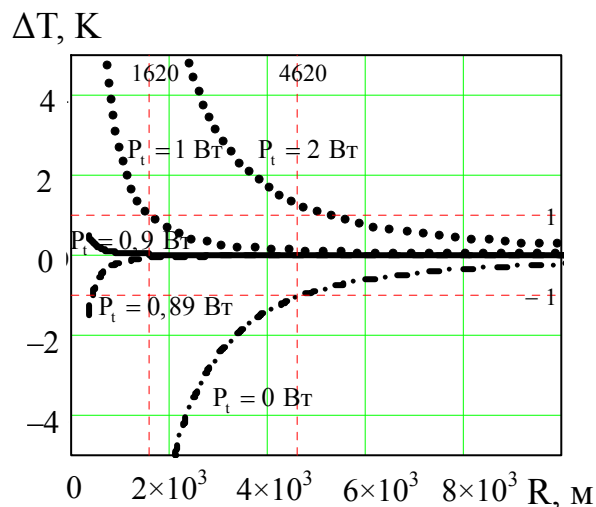


Рис. 4.2. Залежність $\Delta T = f(R)$ для випадку візування наземних об'єктів з верхньої півсфери ($D \rightarrow 0$)

У Табл. 4.1 наведені результати розрахунків дальності виявлення для різної величини порогу відношення сигнал – шум (контрасту порогу «об'єкт – фон»).

Випадок, що розглядався в цій роботі, тобто ситуації вирівнювання радіотеплових температур об'єкта і фону на вході РМ приймача системи виявлення відповідають серединні криві на Рис. 4.1 – Рис. 4.2. Суцільна крива отримана для потужності підсвічування $P_t = 0,9 \text{ Вт}$, пунктирна крива отримана при потужності підсвічування $P_t = 0,89 \text{ Вт}$. При цьому величина радіотеплового контрасту близька до нуля ($\Delta T \approx 0 \text{ К}$) практично на будь-якій дальності виявлення об'єкта.

Таблиця 4.1

Дальність виявлення для різного рівня порогу

Дальність виявлення R_r , м			
Контраст порогу, К	5,91	4	1
Пасивний режим	1946	2350	4620
Підсвічування $P_t = 1 \text{ Вт}$	657	800	1620
Підсвічування $P_t = 2 \text{ Вт}$	2157	2620	5240

У Табл. 4.2 наведені величини контрасту для зазначених потужностей підсвічування, що забезпечують мінімальну дальність виявлення наземного об'єкта з верхньої півсфери.

Таблиця 4.2

Контрасти, які забезпечують вказану дальність виявлення при заданному рівні потужності

Дальність виявлення R_r , м	Потужність підсвічування P_t , Вт	Контраст, К
430	0,89	– 1
355	0,9	0,5

4.3 Результати оцінки ступеня зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів з урахуванням зміни кутів візування системи виявлення

На рисунку 4.3 наведені результати розрахунків, що були виконані за формулою (4.2), радіотеплового контрасту від величини кута місця θ для таких умов візування. Суцільна крива відповідає куту азимуту $\alpha=0^0$, тобто система виявлення «дивиться» суто в бічну поверхню об'єкта, при цьому потужність підсвічування $P_t=0,9$ Вт. Точкова і пунктирна криві відповідають випадку, коли система виявлення візує об'єкт під кутом азимуту $\alpha=40^0$. Цей кут відповідає максимальній площі об'єкта і забезпечує, відповідно, максимальний радіотепловий контраст об'єкта. При цьому пунктирна крива отримана за потужності джерела підсвічування $P_t=0,9$ Вт, тоді як точкова крива при потужності – $P_t=1,07$ Вт.

Штрихпунктирна крива відповідає випадку виявлення малорозмірного наземного об'єкта пасивною радіометричною системою за відсутності підсвічування об'єкта власним джерелом шумового випромінювання.

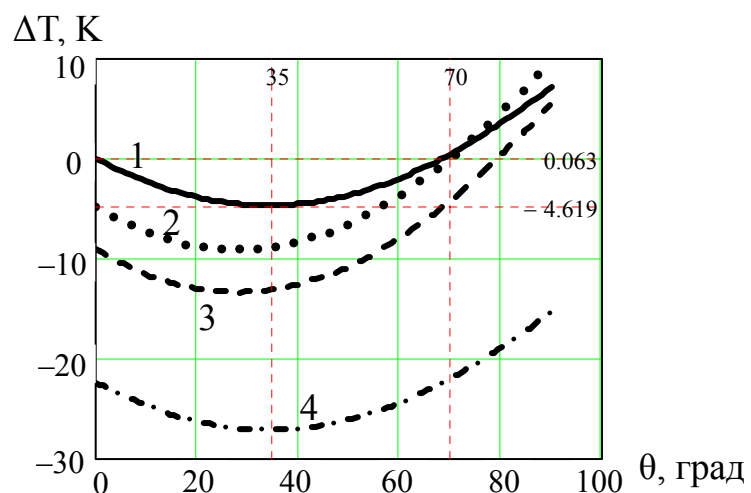


Рис. 4.3. Залежність $\Delta T=f(R)$ для випадку візування наземних об'єктів під різними кутами місця та азимуту. Лінії відповідають наступним умовам: 1 – $\alpha=0^\circ$, $P_t=0,9$ Вт; 2 – $\alpha=40^\circ$, $P_t=0,9$ Вт; 3 – $\alpha=40^\circ$, $P_t=1,07$ Вт; 4 – $\alpha=40^\circ$, $P_t=0$ Вт.

На рисунку 4.3 відзначені два кути місця, $\theta=35^0$ і $\theta=70^0$. Перший кут відповідає куту, при якому забезпечується максимальний контраст об'єкта. Кут місця $\theta=70^0$ – це той кут, під яким наземний об'єкт «видно» системою виявлення при похилому візуванні з дальності кілька кілометрів. Регулювання потужності власного шумового підсвічування повинно здійснюватись з міркувань зниження контрасту «об'єкт – фон» до малих (нульових) значень саме на даній дальності.

Штрихпунктирна крива відповідає величині РМ контрасту «об'єкт – фон», який одержує пасивна РМ система виявлення за відсутності підсвічування об'єкта джерелом власного шумового підсвічування.

На рисунку 4.4 наведені графіки залежності $\Delta T = f(R)$ для кутів азимуту $\alpha=0^0$ і $\alpha=90^0$. Потужність підсвічування при цьому дорівнює $P_t=0,9$ Вт, висота джерела підсвічування $H=1000$ м, дальність до системи виявлення $R=1500$ м.

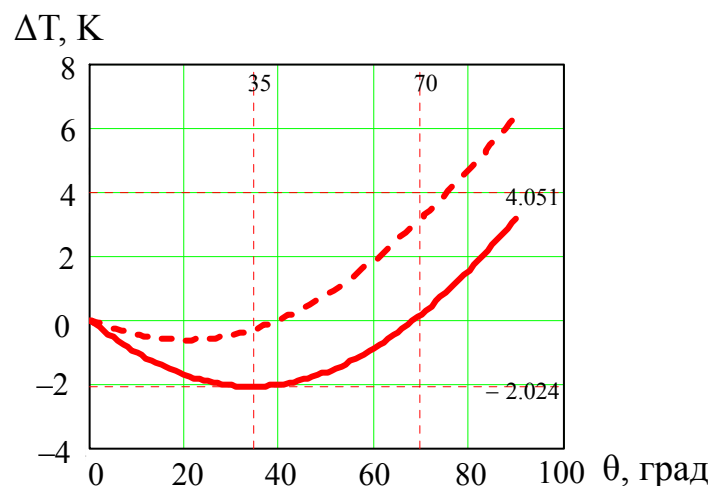


Рис. 4.4. Залежність $\Delta T = f(R)$ для кута азимуту $\alpha=0^0$ (суцільна крива) $\alpha=90^0$ (пунктирна крива)

Регулювання величини потужності власного шумового підсвічування дозволяє забезпечити мінімальний радіотепловий контраст у системі

«малорозмірний наземний об'єкт – фон земної поверхні» при різних кутах місця і азимуту візування об'єкта радіометричною системою виявлення, що істотно знижує імовірність і дальність виявлення об'єкта РМ системою виявлення міліметрового діапазону .

Таким чином, розроблено метод вирівнювання радіотеплових температур малорозмірного наземного об'єкта з великим коефіцієнтом відбиття радіосигналу і фону земної поверхні з більшим коефіцієнтом випромінювання власного шумового сигналу за рахунок застосування власного шумового підсвічування необхідної потужності на певній висоті. Це дозволяє знизити радіотепловий контраст «об'єкт – фон» до малої величини, практично до нуля, що зменшує дальність виявлення об'єкта і істотно знижує імовірність його виявлення.

Необхідний мінімальний рівень контрасту повинен контролюватися власним радіометричним датчиком, для цього методом зворотного зв'язку повинна підтримуватися необхідна потужність джерела шумового підсвічування на визначеній висоті розташування джерела підсвічування.

4.4 Характеристика декомпозиційного методу вимірювання електрофізичних характеристик наземного об'єкта складної форми в ближній і проміжній зонах антени

4.1.1 Постановка задачі. Відомо застосування методу декомпозиції для експериментально-розрахункового визначення радіолокаційної характеристики – ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) наземного об'єкта [78, 79, 102].

Для порівняння різних об'єктів або зразків техніки необхідно знати характеристики відбиття в порівнянних одиницях виміру, до яких, наприклад, відносяться ЕПР та її залежності від кутів спостереження. Застосування радіолокаційних станцій (РЛС) для визначення ЕПР в дальній зоні антени в більшості випадків важко реалізувати технічно. Це викликано необхідністю усунення випромінювання від сусідніх з об'єктом природних ландшафтів

(дерев, кущів) і штучних споруд техногенного характеру (будівель, споруд), яке заважає отримати справжні характеристики досліджуваних об'єктів. Застосування для цих цілей безлунових камер обмежує розміри досліджуваних об'єктів.

Для обґрунтування можливості вимірювання ЕПР декомпозиційним методом у ближній і проміжній зонах антени за допомогою малогабаритних вимірювачів коефіцієнтів відбиття (МВКВ) застосовується така модель візування об'єкта складної форми на фоні земної поверхні.

Оскільки поле, відбите від об'єкта складної форми, має локальний характер відбиття, об'єкт можна замінити сукупністю окремих ділянок. Поле, відбите від кожної такої ділянки еквівалентне полю вторинного джерела, поверхня якого збігається з поверхнею вказаної ділянки. Повне поле являє собою суму полів локальних джерел (без урахування їх взаємодії):

$$\vec{E}^{об} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i^{об}, \quad (4.4)$$

де $\vec{E}_i^{об}$ – вектор електричного поля i -го джерела в місці спостереження,

N – загальна кількість джерел.

Аналогічно можна уявити поле, відбите від фону земної поверхні:

$$\vec{E}^{\Phi} = \sum_{m=1}^n \vec{E}_m^{\Phi}. \quad (4.5)$$

Таким чином, відбитий сигнал від об'єкта, розташованого на фоні земної поверхні, є сумою сигналів, що відповідає відбиттю від фону і об'єкта:

$$\vec{E} = \vec{E}^{\Phi} + \vec{E}^{об} = \sum_{m=1}^n \vec{E}_m^{\Phi} + \sum_{i=1}^N \vec{E}_i^{об}. \quad (4.6)$$

У разі порівняно великої відстані між антеною та об'єктом можна вважати, що всі сигнали мають однакові набіги фаз за рахунок відстані і в подальшому їх не враховувати.

Якщо об'єкт відсутній на поверхні, що досліджується, тоді приймається сигнал пропорційний \vec{E}_ϕ .

Рішення про виявлення об'єкта приймається в разі, коли відбитий сигнал від об'єкта більший за сигнал, що відбивається від поверхні землі без об'єкта, на певну величину порогу, яка визначається характеристиками РЛС (роздільна здатність і чутливість) і вимогами до надійності виявлення, яка визначається через імовірність помилкової тривоги. Використання такого значення порогу узгоджене, оскільки можуть бути відсутніми оперативні відомості про РЛС. Для реєстрації сигналу дуже часто використовується умова його перевищення над шумами (фоном) в 1,5 – 3 рази. Таким чином, умови надійного виявлення можна визначити наступним чином:

$$U^{об} - U^{\phi} > kU^{пор} + U^{шум}, \quad (4.7)$$

де $k = \begin{cases} 0 & \text{— за відсутності порогового значення;} \\ 1 & \text{— за визначеного порогового значення} \end{cases}$

Наземний спосіб контролю при вимірюванні характеристик відбитого поля із застосуванням МВКВ може бути реалізований в безпосередній близькості від об'єкта, тобто в ближній і проміжній зонах антени.

Вимірювання проводиться на ділянках поверхні об'єкта при його декомпозиції.

4.4.2 Методика вимірювання характеристик радіолокаційного відбиття об'єктів декомпозиційним методом в ближній і проміжній зонах антени. В основу методики вимірювання характеристик радіолокаційного відбиття об'єктів покладено той факт, що поле, відбите від об'єкта складної форми, має локальний характер [79, 80, 88 – 92, 102]. Таким чином, повне поле від об'єкта представляє суму полів від локальних ділянок (без урахування взаємодії), коефіцієнт відбиття K_i кожного з них можна виміряти за допомогою МВКВ. Вимірювання проводяться на ділянках поверхні об'єкта шляхом його декомпозиції. Розділимо цю поверхню на складові частини зі сторонами кожної з частин більше за довжину хвилі $d > \lambda$. Величина сторін кожної ділянки

обирається рівною розмірам плями, яка створюється МВКВ на поверхні об'єкта, по рівню 0,5 для заданої відстані R . МВКВ розташовується на відстані R від центрів ділянок таким чином, щоб його оптична вісь проходила через ці центри, і з його допомогою визначаються амплітуди відбитих хвиль від ділянок об'єкта. При кожному наступному вимірі МВКВ переміщується на величину d .

Так як поле, відбите від об'єкта складної форми, являє собою суму полів від окремих його ділянок, то середня ЕПР всього об'єкта $\bar{\sigma}_{об}$ наближено дорівнює сумі середніх ЕПР локальних ділянок ($\bar{\sigma}_i$) для випадку, коли фази відбитих полів взаємно незалежні і випадкові:

$$\bar{\sigma}_{об} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\sigma}_i, \quad (4.8)$$

де N – кількість ділянок у методі декомпозиції.

ЕПР локальних ділянок об'єкта визначається за допомогою еталону і обчислюється за формулою:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{P_{об}}{P_{ет}} \bar{\sigma}_{ет} = K_{iоб} \bar{\sigma}_{ет}, \quad (4.9)$$

де $P_{об}$ і $P_{ет}$ – потужності відбитих сигналів від ділянок об'єкта і еталону, відповідно,

$$K_{iоб} = \frac{P_{об}}{P_{ет}} - \text{значення коефіцієнту відбиття від ділянки об'єкта за потужністю.}$$

В якості еталона розглядається плоский металевий екран з $K_{ет}=1$, геометричні розміри якого дорівнюють:

$$a=2R \operatorname{tg} \theta_{0,5}^{\circ}/2, \quad b=2R \operatorname{tg} \varphi_{0,5}^{\circ}/2, \quad (4.10)$$

де R – відстань від локальної ділянки до апертури випромінюючої антени МВКВ,

$\theta_{0,5}^{\circ}$, $\varphi_{0,5}^{\circ}$ – значення ширини діаграми спрямованості рупору випромінювання на половині потужності в градусах.

Таким чином, методика вимірювання характеристик радіолокаційного відбиття об'єкта за допомогою МВКВ включає в себе наступні етапи:

1. Калібрування МВКВ по пласкому металевому екрану, який розташовано на відстані R від МВКВ.

2. Визначення розмірів ділянки декомпозиції за формулами (5.7).

3. Поділ характерних розмірів об'єкта на $m \times n$ ділянок:

$$L1=a \times m, L2=b \times n,$$

де $L1, L2$ – характерні розміри об'єкта по горизонталі та вертикалі, відповідно, m, n – кількість ділянок по горизонталі та вертикалі, відповідно.

4. Визначення коефіцієнтів відбиття кожної з ділянок для заданого напрямку за допомогою МВКВ (K_{iob}).

5. Обчислення ЕПР еталону

$$\bar{\sigma}_{et} = \frac{4\pi(a \times b)^2}{\lambda^2}. \quad (4.11)$$

6. Обчислення середньої моностатичної ЕПР об'єкта для заданого напрямку спостереження:

$$\bar{\sigma}_{ob} = \frac{\bar{\sigma}_{et}}{n \times m} \sum_{i,j=1}^{n,m} K_{ob,i,j}. \quad (4.12)$$

Таким чином, проаналізована можливість застосування декомпозиційного методу для вимірювання відбиваючої спроможності – ефективної поверхні розсіювання малорозмірних наземних об'єктів складної форми в ближній та проміжній зонах антени.

4.5 Розвиток декомпозиційного методу формування радіометричних зображень малорозмірних наземних об'єктів в ближній і проміжній зонах антени радіометру

Детальний опис РМ вимірювального комплексу (РМВК) ММД (Рис. 4.6) наведено в роботах [25 – 27]. Технічні характеристики РМ датчика ММД

наведені в Табл. 4.3. Методика розрахунку дводзеркальної антени Касегрена для даного РМВК ММД проведена за результатами робіт [88 – 92].

Опорно-поворотний пристрій (ОПП), на якому розміщені антена і високочастотна частина радіометру, дозволяє здійснювати огляд простору у широкому діапазоні кутів: аж до $\pm 90^\circ$ від напрямку на об'єкт (за азимутом) і $\pm 45^\circ$ від горизонту (за кутом місця).

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) забезпечує оцифровування вихідного сигналу РМ приймача в ПЕОМ, шляхом перетворення напруги з аналогового виходу РМ, яка повільно змінюється, в цифрову послідовність. АЦП є багатоканальним і допускає проведення одночасних вимірювань і паралельної обробки сигналів 8 каналів (датчиків). Кількість рівнів дискретизації вхідного сигналу в кожному з каналів 1024 (10 розрядів двійкового коду).

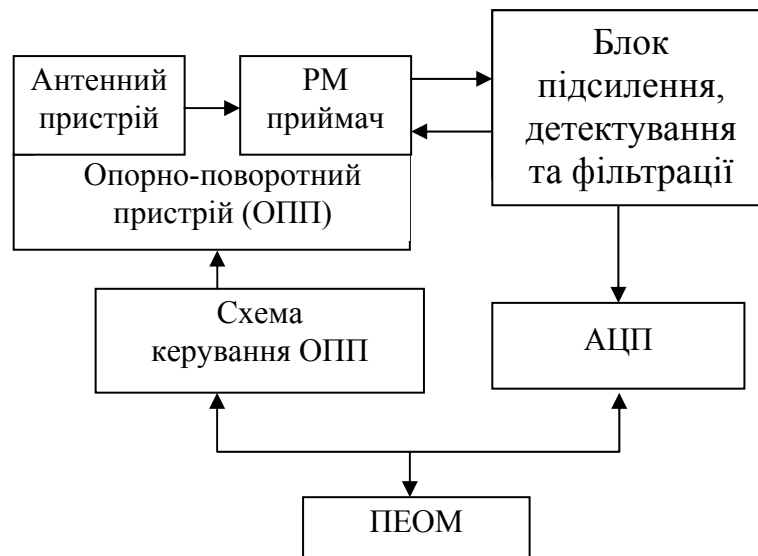


Рис. 4.6. Схема РМВК ММД

Схема керування ОПП задає режим роботи опорно-поворотному пристрою і забезпечує синхронність роботи поворотного пристрою і ПЕОМ в процесі отримання РМ зображень.

Результати зйомки записуються на твердий диск ПЕОМ у вигляді:

- текстового файлу, що містить таблицю значень (відліків) аналого-цифрового перетворювача;
- графічного файлу формату BMP;
- інформаційного текстового файлу, що описує умови проведення експерименту.

Для зниження шумів АЦП застосовується фільтрація результатів радіометричної зйомки. При заданому розмірі вікна фільтра обчислюється середнє значення (усереднення) або знаходиться медіанне значення (медіанна фільтрація). Результат медіанної фільтрації, з шириною вікна згладжування 5, представлений у вигляді графіка на Рис. 4.7, де крива 1 – дані без обробки, крива 2 – результат медіанної фільтрації.

Таблиця 4.3

Характеристики РМ датчика

Довжина хвилі	8,6 мм
Фокусна система – дводзеркальна антена Касегрена, діаметр	350 мм
Лінійна розподільна здатність на дальності: 25 м 10 м	750 мм 300 мм
Тип РМ приймача	модуляційний, прямого підсилення
Діапазон вимірюваних температур	(0 – 500) К
Флуктуаційна чутливість	0,077 К/с
Стала часу вимірювання	1 с, 0,1 с, 0,01 с
Точність вимірювання радіотеплової температури	0,85 К
Вигляд вихідної шкали	лінійна
Поляризація випромінювання	лінійна, вертикальна (горизонтальна)

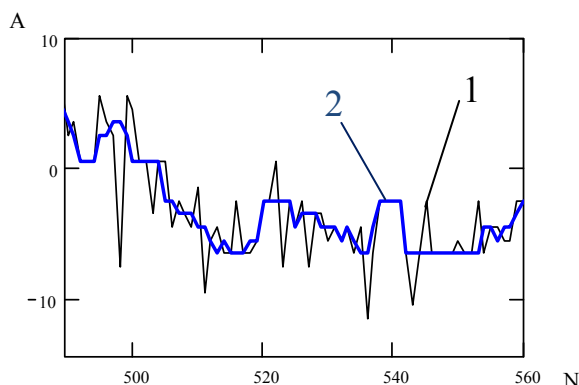


Рис. 4.7. Результат медіанної фільтрації шумів АЦП і радіометру. Крива 1 – дані без обробки, крива 2 – результат медіанної фільтрації.

4.5.1. Методика проведення вимірювань Вимірювання радіотеплової температури малорозмірних об'єктів і поверхонь у ближній і проміжній зонах антени радіометричного датчика проведені за методикою, яка визначає вимірювання декомпозиційним методом і наведена в роботах [33, 78 – 80], було виконано за участю автора.

Основним режимом формування РМ зображень в ММД є режим «автоматичного» керування становищем опорно-поворотного пристрою. У цьому режимі здійснюється порядкове сканування променя ДСА радіометра в заданому секторі тілесного кута з подальшим формуванням растрових напівтонових або кольорових зображень на екрані дисплея ПЕОМ. При цьому сигнал з виходу аналогового каналу радіометра надходить на АЦП керуючої ЕОМ, а одержувані дані реєструються в пам'яті ПЕОМ у вигляді відносних двійкових відліків (рівнів сигналу) для кожної точки зображення.

Передбачено також режим «ручного» контролю становищем поворотним пристроєм. У цьому випадку наведення і позиціонування променя ДСА радіометра на необхідну ділянку об'єкта проводиться напівавтоматично, оператор здійснює контроль процесу наведення за допомогою оптичного візиру.

Послідовність проведення вимірювань:

1. Встановлення динамічного діапазону радіометра в межах від температури неба в зеніті до температури імітатора абсолютно чорного тіла (АЧТ).

2. Встановлення антени в початкове положення, наприклад, під кутом $\theta=35^\circ$ від надиру.

3. Радіальне розміщення в зоні огляду антени плаского відкритого металевого листа, металевого листа під маскувальним покриттям (МП) – радіопоглинаючим матеріалом (РПМ), і імітатора АЧТ згідно зі схемою (рисунок 4.8).

4. Проведення вимірювань здійснюється відповідно до наведеного нижче алгоритму.

Алгоритм вимірювання випромінювальної здатності:

1. Сканування досліджуваних поверхонь із записом результатів вимірювання в пам'ять ПЕОМ.

2. Обробка результатів вимірювання на ПЕОМ:

а) поділ цифрового масиву відліків АЦП на три частини, які відповідають металу, маскувальній сітці та імітаторові АЧТ;

б) обчислення середніх значень відліків АЦП для металу, РПМ, імітатору АЧТ (Рис. 4.8, Рис. 4.9);

в) обчислення коефіцієнта випромінювання РПМ відповідно до методики розрахунку.

4.5.2. Методика розрахунку коефіцієнта випромінювання маскувального покриття на основі сітки.

1. Прийняті припущення:

- через малі значення відстаней від антени до підстильної поверхні (ближня або проміжна зона антени) загасанням в атмосфері нехтуємо;

- вважаємо, що металевий лист є дзеркально відбиваючою поверхнею, а імітатор АЧТ і маскувальна сітка – дифузно розсіюють електромагнітні хвилі [44 – 47];

- радіотеплова температура неба, відбита від поверхні, що дифузно розсіює випромінювання, дорівнює температурі неба при куті спостереження $90^\circ - \theta = 55^\circ$.

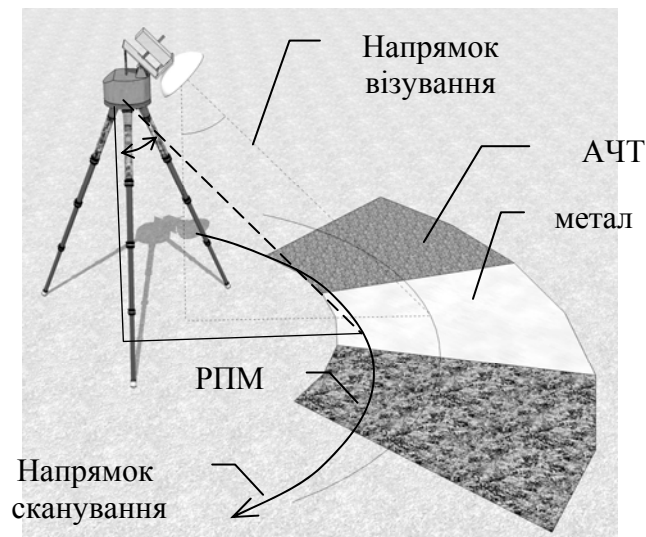


Рис. 4.8. Схема розташування тестових зразків поверхонь у ближній і проміжній зонах антени РМВК



Рис. 4.9. Результати оцінки середніх значень радіояскравості та контрастів підстильних поверхонь

2. Вихідні данні для розрахунків:

T_H – радіотеплова температура неба при куті спостереження 55° [81]
 ($T_H \approx 50 K$);

T_0 – температура підстильної поверхні (вимірюється термометром);

k_M – коефіцієнт випромінювання пофарбованого металу ($k_M = 0,01$);

$k_{АЧТ}$ – коефіцієнт випромінювання імітатора АЧТ ($k_{АЧТ}=0,98$);

A_M – середнє арифметичне відліків АЦП, що відповідають радіояскравості металу (розраховується за результатами вимірювань);

$A_{АЧТ}$ – середнє арифметичне відліків АЦП, що відповідають радіояскравості АЧТ (розраховується за результатами вимірювань);

$A_{МП}$ – середнє арифметичне відліків АЦП, що відповідають радіояскравості маскувального покриття (сітки) (розраховується за результатами вимірювань).

3. Розрахунок радіотеплової температури АЧТ і металу:

$$T_{АЧТ} = T_0 \times k_{АЧТ} + T_H (1 - k_{АЧТ}), \quad T_M = T_0 \times k_M + T_H (1 - k_M). \quad (4.4)$$

4. Розрахунок радіотеплової температури маскувального покриття:

$$T_{МП} = \frac{(A_{МП} - A_M)(T_{АЧТ} - T_M)}{(A_{АЧТ} - A_M)} + T_M \quad (4.5)$$

5. Розрахунок коефіцієнта випромінювання маскувальної сітки:

$$k_{МП} = \frac{(T_H - T_{МП})}{(T_H - T_0)}. \quad (4.6)$$

4.5.3. Оцінка зниження радіотеплового контрасту «об'єкт – фон».

Відомо, що випромінювальна здатність фону (грунту, трав'яного покриву) лежить в межах $k_\Phi = 0,85 - 0,95$.

Значення радіотеплової температури фону знаходиться за формулою:

$$T_\Phi = T_0 \times k_\Phi + T_H (1 - k_\Phi). \quad (4.7)$$

Оцінка зниження контрасту «метал під МП – фон земної поверхні» здійснюється за формулою:

$$k_{зо} = \frac{|T_\Phi - T_M|}{|T_\Phi - T_{МП}|}, \quad (4.8)$$

де $k_{зо}$ – коефіцієнт зниження радіотеплового контрасту замаскованого об'єкта.

4.5.4. Оцінка похибки вимірювань. Відносна похибка вимірювання контрасту залежить від відносної похибки вимірювання радіотеплових температур об'єкта і фону.

Проведемо оцінку максимальної відносної похибки вимірювання радіотеплової температури.

Максимальні відносні похибки вимірювання фізичних величин, за якими оцінюється радіотеплова температура, такі:

$${}^{\text{TM}}T_0 = \frac{1}{600} = 0,167\%; \quad {}^{\text{TM}}k_{30} = \frac{1}{100} = 1\%, \quad {}^{\text{TM}}T_H = \frac{5}{280} = 1,79\%.$$

Вважаючи, що похибки даних величин розподілені за нормальним законом (максимальна похибка в 2,7 рази більша за середньоквадратичну похибку) і статистично незалежні [53], отримуємо, що дисперсія оцінки радіотеплової температури відповідно до розробленої методики складе величину:

$$\begin{aligned} \sigma_{T_M}^2 &= \left(\frac{dT}{dk_{30}} \right)^2 \times \sigma_{k_{30}}^2 + \left(\frac{dT}{dT_0} \right)^2 \times \sigma_{T_0}^2 + \left(\frac{dT}{dT_H} \right)^2 \times \sigma_{T_H}^2 = \\ &= (T_0 - T_H)^2 \times \sigma_{k_{30}}^2 + k_{30} \times \sigma_{T_0}^2 + \sigma_{T_H}^2. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Підставляючи в дане співвідношення відповідні значення похибок, отримуємо:

$$\sigma_{T_i}^2 = (300 - 20)^2 \cdot 0,0037^2 + 0,98 \cdot 0,185^2 + 1,85 = 2,957 \text{ K}.$$

Інструментальна похибка радіометра відома: $\sigma_{T_{PM}}^2 = 0,85 \text{ K}$.

Таким чином, середньоквадратична похибка вимірювання радіотеплової температури становить:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{T_i}^2 + \sigma_{T_{PM}}^2} = \sqrt{2,957^2 + 0,85^2} = 3,077 \text{ K}.$$

Похибка вимірювання радіотеплового контрасту становить:

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{3,077^2 + 3,077^2} = 4,352 \text{ K}.$$

За умови, що максимальний динамічний діапазон сигналу 280 K, відносна середньоквадратична похибка вимірювання радіотеплового контрасту становить 1,554%.

4.6 Результати експериментальної оцінки радіотеплового випромінювання об'єктів сцени при декомпозиційному методі

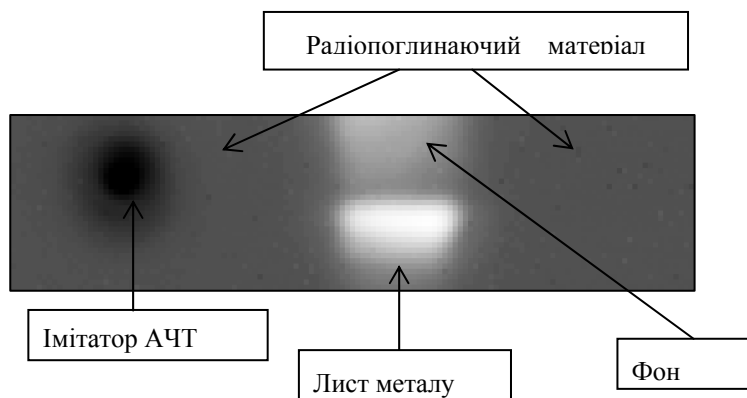
На Рис. 4.10 а наведено фотозображення сцени з розташованими на ній об'єктами. На Рис. 4.10 б наведено радіометричне зображення сцени, сформоване РМВК 8 мм діапазону на відстані $R=3\text{ м}$. Розмір елемента, що відповідає роздільній здатності приймача, на даній відстані дорівнює $d=90\text{ мм}$.

Радіопоглинаючий матеріал (РПМ) являє собою маскувальне покриття на основі сітки (типу РПМ «Контраст» [42, 43]).

Як імітатор АЧТ використовувалася люмінесцентна лампа. Фоном виступало вікно, яке було завіщене бавовняною шторою.



а)



б)

Рис. 4.10. Фото (а) і радіометричне зображення (б) «сцени», що подана на схемі Рис. 4.8.

На Рис. 4.11 наведена діаграма значень радіотеплової температури об'єктів сцени (Рис. 4.10). Найбільш «холодним», як впливає з теорії

радіометрії (Рис. 4.9), на даній діаграмі є метал з радіотепловою температурою меншою за 50К. Найбільш «гарячим» є імітатор АЧТ. Проміжні значення займають фон (завішене вікно) і радіопоглинаючий матеріал. Дана діаграма підтверджує положення якісного характеру, наведені на Рис. 4.9.

Розміри елементів ($d \approx 90$ мм), що відповідають роздільній здатності, дозволяють досить чітко розрізняти окремі елементи сцени. Найменші розміри має імітатор АЧТ – люмінесцентна лампа. Розміри лампи збільшені (обмежені) металевим абажуром. До того ж швидкість сканування РМ датчика відносно кута азимуту обрана такою, щоб відповідати перетинанню ДС антени датчика приблизно на половину ширини.

На рисунку 4.11 наведені результати вимірювань радіотеплової температури для двох різних рядків поблизу центру зображення.

У даному експерименті радіометричне зображення отримано в проміжній зоні антени радіометричного датчика.

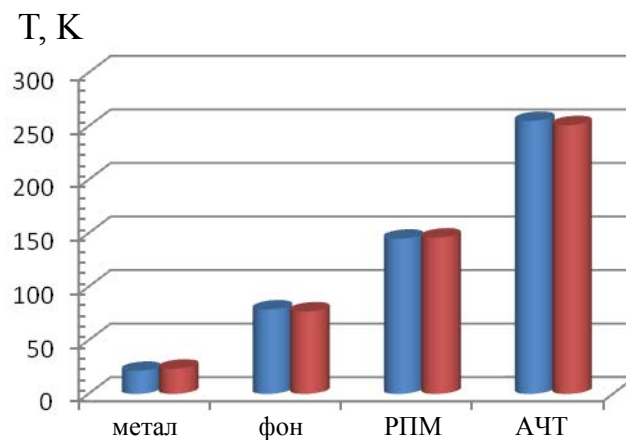


Рис. 4.11. Діаграма значень радіотеплової температури об'єктів сцени, яка подана на Рис. 4.10

У Табл. 4.4 наведені результати кількісної оцінки радіотеплової температури для різних поверхонь сцени (Рис. 4.10). Дані Табл. 4.4 подані у вигляді перерахованих значень стрілочного індикатору вихідного електровимірювального приладу.

**Результати кількісної оцінки радіотеплової температури об'єктів сцени,
яка наведена на Рис. 4.10**

Метал	Фон	РПМ	АЧТ
0,161	0,765	1,044	1,779
0,182	0,826	1,043	1,794
0,202	0,588	1,041	1,792
0,18	0,571	1,04	1,812
0,166	0,545	1,032	1,778
0,152	0,556	1,024	1,8

Таким чином, підтверджена можливість застосування методу декомпозиції для вимірювання радіотеплової температури різних поверхонь, покриттів, а також елементів об'єкта. Даний метод може бути використаний при формуванні радіометричних зображень об'єктів складної форми в ближній і проміжній зонах антени радіометричного датчика.

**4.7 Результати експериментальної оцінки виявлення та ідентифікації
замаскованих наземних об'єктів радіометричними датчиками
міліметрового діапазону**

4.7.1 Результати експериментів. У наш час для вирішення задач виявлення та ідентифікації малорозмірних рухомих наземних об'єктів є недостатньо експериментальних даних відносно формування радіометричних зображень об'єктів на фоні земної поверхні, відсутні кількісні оцінки зниження помітності об'єктів внаслідок застосування пасивних засобів захисту в міліметровому діапазоні.

На цей час відомі пропозиції щодо створення матричних радіометричних кореляційно-екстремальних систем виявлення міліметрового діапазону та патенти щодо проведення теоретичних і експериментальних досліджень,

пов'язаних з отриманням РМ зображень малорозмірних замаскованих наземних об'єктів за допомогою як РМ датчиків, що сканують об'єкти на фоні земної поверхні, так і матричних РМ систем ММД, з метою подальшої ідентифікації об'єктів в умовах невизначеності [25 – 27]. У роботах [25 – 27, 104, 105] наведені результати радіометричної зйомки малорозмірних об'єктів за допомогою РМВК ММД.

У роботах [25 – 27, 42, 43] для захисту наземних об'єктів пропонується застосування маскувального покриття (МП) типу «Контраст», характеристики якого наведені в роботах [42, 43]. Застосування МП «Контраст» перешкоджає оптичній візуалізації об'єкта та істотно послаблює випромінювання об'єкта в різних діапазонах довжин хвиль (мова йде про інфрачервоний, сантиметровий), у тому числі і в міліметровому діапазоні. Застосування такого покриття, за задумом авторів робіт [42, 43], повинно запобігти створенню цільного зображення об'єкта радіометричними інформаційними датчиками систем виявлення ММД.

Протягом декількох років проводились експерименти, у ході яких отримані радіометричні зображення (РМЗ) замаскованих та незамаскованих малорозмірних наземних об'єктів на фоні трави та хвойного лісу, а також на фоні неба при настільних (по відношенню до земної поверхні) кутах візування.

Контраст радіояскравості об'єктів по відношенню до земної поверхні (трава) досягав значень 150 К. Інтенсивність радіотеплового випромінювання металевих частин об'єкта (інтенсивність відбитого випромінювання холодного неба) незалежно від ракурсу візування поширена рівномірно і практично не має виражених яскравих точок. Більш високу температуру радіояскравості мають частини об'єкта, які вкрито гумою. Більш контрастним є наземний об'єкт на фоні неба.

У ході експериментів були отримані РМЗ об'єктів зі стійким контрастом радіояскравості «об'єкт – фон», знак контрасту під час вимірювань не змінювався.

З отриманих результатів можуть бути зроблені наступні висновки.

Контраст «об'єкт – фон» у випадку одношарового покриття знижується на (7 – 8)дБ, знак контрасту не змінюється.

Двошарове МП набагато краще екранує об'єкт. Радіотеплове випромінювання об'єкта під двошаровим покриттям дуже близьке за своїм рівнем до випромінювання фону земної поверхні і лісу. Однак кількісні оцінки контрасту підтверджують можливість виявлення об'єкта і в цьому разі, але дальність виявлення суттєво знижується.

На рисунку 4.12 наведені фото і РМЗ автомобіля за умови, що автомобіль частково вкрито маскувальним покриттям на основі сітки (аналог МП «Контраст»).

На рисунку 4.13 наведено у цифровому вигляді радіометричні зображення автомобіля, що були отримані за допомогою РМВК 8 мм діапазону і відображені на ПЕОМ. Цифрові данні, які відповідають відкритій частині автомобілю позначені жовтим кольором.

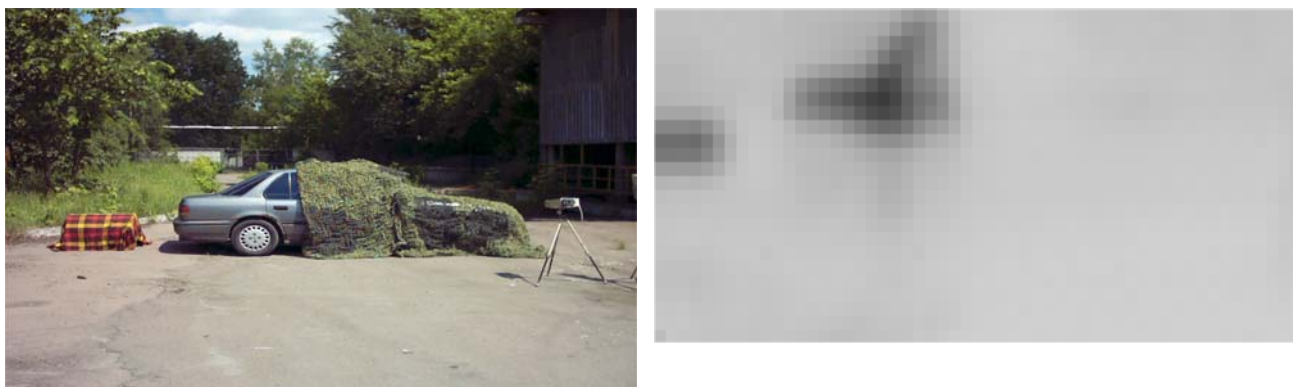


Рис. 4.12. Фото і РМЗ автомобіля (частина автомобіля під МП)

На цифровому зображенні введені граничні позначення за для 600 одиниць псевдояскравості. Зображення представляє собою растр розміром «40 (рядків) і 25 (стовбців)». Перший рядок ілюструє дерева на задньому плані автомобіля. На двох нижніх рядках спостерігається тільки фон земної поверхні.

Розрахунок за методикою, що була описана у розділі 3, дозволяє зробити висновок про те, що дальність виявлення автомобіля за допомогою РМ зменшується в 2,154 рази.

719	715	707	679	634	603	626	690	752	790	799	805	809	813	811	811
768	766	770	772	772	767	774	770	768	759	758	748	742	736	727	720
701	691	669	611	541	522	568	651	736	784	799	807	815	815	816	816
701	690	655	584	499	464	497	563	656	737	787	795	811	813	819	816
680	651	591	497	427	439	507	573	648	727	780	798	806	811	811	810
583	548	474	383	364	443	527	573	636	722	779	793	805	807	807	811
430	402	339	283	311	414	493	524	588	687	768	789	797	806	809	808
347	303	260	237	279	375	453	483	550	663	755	787	794	803	806	805
287	312	389	469	515	565	658	743	781	792	797	805	804	802		
565	510	454	424	431	483	558	609	639	691	755	787	799	804	807	811
442	442	440	429	489	590	703	773	790	789	775	757	737	730	724	699
480	480	483	480	532	619	715	780	796	793	780	759	750	743	741	731
701	679	662	662	683	715	736	743	759	784	795	800	805	810	809	805
618	615	615	614	643	689	748	784	796	792	782	769	747	743	739	735

Рис. 4.13. Цифрове РМЗ автомобіля, частково вкритого МП

4.7.2. Результати напівнатурних експериментів – вимірювань температури радіояскравості малорозмірного наземного об’єкта. Експерименти проведені за допомогою радіометра зі скануванням міліметрового діапазону і за їх результатами було визначено ефективність засобів маскування.

Об’єктом експериментів є малорозмірний наземний об’єкт, який вимірювався за умови наявності та відсутності засобів зниження помітності.

Метою експериментів є визначення областей об’єкта з високим рівнем радіотеплового (радіояскравого) випромінювання за допомогою радіометричного датчика міліметрового діапазону радіохвиль, а також оцінка

зниження інтенсивності випромінювання від областей об'єкта за рахунок застосування засобів зниження помітності.

Показниками, що оцінюються в ході експериментів, є наступні:

- величина випромінювальної здатності різних покриттів поверхні об'єкта, яка оцінюється по радіометричному зображенню («портрету») об'єкта в 8 мм діапазоні радіохвиль;
- відносне значення інтенсивності власного радіотеплового випромінювання окремих областей поверхні об'єкта;
- ослаблення інтенсивності власного радіотеплового випромінювання за рахунок використання маскувального покриття.

Калібрування радіометра зі скануванням діаграми спрямованості антени здійснюється по «холодному» небу і абсолютно чорному тілу.

Умови проведення експериментів. Експерименти проводилися в листопаді 2018 року при наступних погодних умовах:

- температура навколишнього повітря – $3 \div +5^{\circ}\text{C}$;
- відносна вологість повітря від 45 % до 80 %;
- 12, 14–16 листопада – похмуро, 13 листопада – сонячно.

Визначення рівня радіотеплового випромінювання проводилось на відкритій площадці.

4.7.3. Результати експериментів. Значення випромінювальної здатності різних типів поверхні в 8 мм діапазоні (дані довідника) приведені в Табл. 4.5.

Найбільш ймовірні фони, на яких розташовані об'єкти, є асфальт, бетон, крупний гравій, суха трава, пашня, пісок, густа рослинність. Випромінювальна здатність перелічених типів поверхонь лежить в діапазоні 0,76 – 0,93. Середнє значення випромінювальної здатності даних фонів має значення 0,845. У зв'язку з цим мінімальний середній контраст радіояскравості об'єкта в реальних умовах застосування забезпечується при значенні коефіцієнту випромінювання рівному 0,845.

Довідникові значення випромінювальної здатності різних типів природних та штучних поверхонь у 8 мм діапазоні

Тип поверхні	Випромінювальна здатність
Густа рослинність (ліс)	0,93
Пашня	0,92
Суха трава	0,91
Пісок	0,9
Резина (покришки)	0,86
Крупний гравій	0,84
Асфальт	0,83
Бетон	0,76
Скло	0,76
Сухий сніг	0,88–0,76
Гладкі скали, камені	0,75
Метал	0,00

Визначення рівня контрасту радіояскравості об'єкту без застосування широкопasmового маскувального покриття. Аналіз радіотеплових портретів об'єкта в 8 мм діапазоні показав, що об'єкт без МП чітко виявляється на радіометричному зображенні (Рис. 4.14).



Рис. 4.14. Радіотеплове зображення об'єкту

Контраст радіояскравості резинових покришок коліс і пластикових елементів конструкції об'єкта відносно земної поверхні і рослинності має не велике значення і виявляється тільки з мінімальної дальності, що дорівнює декілька десятків метрів. Радіометричний контраст металевої кабіни і інших металевих деталей є максимальним (наприклад, температура радіояскравості кабіни практично дорівнює температурі радіояскравості неба). Так як площа металевих частин достатньо велика, об'єкт без МП може бути легко виявлений засобами радіометричної розвідки на відносно великих відстанях.

Охарактеризуємо вплив маскувального покриття на радіотеплове випромінювання об'єкта. На Рис. 4.15 представлено радіотеплове зображення правого борта об'єкта. МП покриває кабіну об'єкта.

Результати вимірювань показують, що рівень контрасту радіояскравості кабіни значно знижується завдяки застосуванню МП. Результати розрахунків зведені в Табл. 4.6.

Величина контрасту «об'єкт – фон земної поверхні» приведена в умовних одиницях радіояскравості.



Рис. 4.15. Радіотеплове зображення об'єкта, кабіна під МП

У перших двох строках Табл. 4.6 приведені результати вимірювань рівнів радіояскравості, отримані в окремих найбільш «яскравих» точках об'єкта, в найбільш «яскравій» точці кабіни під МП, і в найбільш «темній» точці на правому боці об'єкта, який не закрий ширококутовим маскувальним покриттям.

Величина контрасту «об'єкт – фон земної поверхні»

Тип контрасту	Величина контрасту	Зниження контрасту в наслідок застосування МП
Контраст «правий борт об'єкта без МП – бетон»	987	15,185 разів
Контраст «кабіна об'єкта під МП – бетон»	65	
Осереднений контраст «правий борт об'єкта без МП – бетон»	891	13,92 разів
Осереднений контраст «кабіна об'єкта під МП – бетон»	64	

Третя і четверта строки Табл. 4.6 – це результати вимірювань контрасту, отримані по усередненим на деякій кількості елементів (пікселів) зображення, з близькими рівнями радіояскравості.

Результати вимірювань, як в окремих точках, так і усереднені по об'єкту, співпадають з великою точністю.

В Табл. 4.7 наведені результати розрахунку для випадку зниження контрасту радіояскравості кабіни об'єкта за допомогою МП, яке також приведене на цифровому зображенні об'єкта (Рис. 4.16). Для розрахунку також взяті усереднені дані по десяти елементах (пікселях) зображення.

Дані Табл. 4.7 представляють собою один з варіантів. Можливим є варіант з більш низьким, ніж у Табл. 4.7, значенням рівня контрасту на елементах об'єкта, не вкритих МП. В такому випадку зниження контрасту внаслідок застосування МП буде в межах (4 – 5) разів.

Величина контрасту «об'єкт – фон земної поверхні»

Тип контрасту	Величина контрасту	Зниження контрасту завдяки застосуванню МП
Осереднений контраст «правий борт об'єкта без МП – бетон»	891	6,02 разів
Осереднений контраст «кабіна об'єкта під МП – бетон»	148	

4.7.4 Висновки. Таким чином, проведені вимірювання дозволяють зробити висновок про практичну можливість виявлення з подальшою ідентифікацією малорозмірних наземних об'єктів, у тому числі по окремим елементам об'єктів.

Як показали попередні дослідження [26], результати експериментальних досліджень підтверджують можливість підвищення ефективності РМ систем виявлення ММД (систем розвідки супротивника), які застосовують активне підсвічування об'єктів візування. Застосування комбінованого пасивно-активного режиму роботи підвищує відношення сигнал-шум на вході і виході системи. Для радіометричних систем виявлення це веде до підвищення інформативності зображень і, як наслідок, до збільшення дальності виявлення і ідентифікації наземних об'єктів.

Коефіцієнт зниження контрасту радіотеплових температур «малорозмірний наземний об'єкт – фон» внаслідок застосування МП [25, 27] оцінювався як в окремих точках об'єкта, так і на основі порівняння усереднених по зображенню значень радіояскравості об'єкта і фону.

Результати точкових і усереднених оцінок зійшлися. Максимальний контраст «об'єкт без МП – трава, хвойний ліс» досягає значення у 177К

(умовних одиниць радіояскравості). Максимальний контраст «об'єкт під одношаровим МП – трава, хвойний ліс» дорівнює 51К. Застосування одношарового радіопоглинаючого МП [27] веде до зниження контрасту радіояскравості «об'єкт – трава, хвойний ліс» у середньому на $\sim 5,4 \pm 0,25$ дБ, тобто у $3,47 \pm 0,1$ рази. Знак контрасту не змінювався, РМ зображення об'єкта залишається цільним зі стійкою конфігурацією.

Отримані оцінки ступеню зниження контрасту «об'єкт – трава», що моделює випадок візування об'єкта інформаційним датчиком РМ системи виявлення з верхньої півсфери. При цьому усереднений за площею контраст «об'єкт без МП – трава» складає величину 85К, контраст «об'єкт з МП – трава» складає величину 13К. Ступінь зниження контрасту внаслідок застосування МП дорівнює величині $\sim 8,15 \pm 0,25$ дБ ($6,54 \pm 0,1$ раз). Знак радіотеплового контрасту не змінюється.

Зроблена кількісна оцінка зниження контрасту «елемент об'єкта – трава» внаслідок застосування МП. Середній контраст «елемент об'єкта без МП – трава» дорівнює 39К, контраст «елемент об'єкта під МП – трава» дорівнює 5К. Рівень зниження контрасту за рахунок застосування МП $\sim 8,92 \pm 0,25$ дБ ($7,8 \pm 0,1$ раз).

Застосування двошарового МП [27] веде до того, що випромінювання «холодних» металевих поверхонь об'єкта суттєво екранується «теплим» випромінюванням МП, яке за величиною є близьким до випромінювання хвойного лісу і трави. Рівень зниження контрасту внаслідок застосування двошарового МП дорівнює величині $\sim 7,88 \pm 0,25$ дБ ($6,14 \pm 0,1$ раз).

Елемент об'єкта, що вкрито двошаровим МП, виділити на РМЗ складно, так як радіотеплова температура елемента під МП дорівнює радіотепловій температурі фону (хвойного лісу), а коефіцієнт заповнення променя ДСА частиною елемента об'єкта на дальності 25м дорівнює не більш 0,22. Контраст «елементу об'єкта (ствол) – трава» дорівнює у середньому 13К і у випадку візування з верхньої півсфери даний елемент об'єкта може бути виявлений.

Проведені напівнатурні експерименти зниження випромінювання малорозмірного наземного об'єкта у міліметровому діапазоні радіохвиль за допомогою радіометричного датчика зі скануванням діаграмою спрямованості антени.

Експерименти дозволили виділити основні інтенсивні джерела радіотеплового контрасту в ММ діапазоні:

- основним джерелом є відкриті металеві частини кабіни і металеві борта об'єкта, які перевідбивають випромінювання «холодного» неба;
- демаскуючим фактором також є колеса, не вкриті щитами-екранами;
- результати розрахунків дозволяють зробити висновок про зниження контрасту радіояскравості «об'єкт – фон земної поверхні» завдяки застосуванню широкосмугового маскувального покриття; коефіцієнт зниження контрасту внаслідок застосування МП лежить в діапазоні (4 – 15) разів;
- коефіцієнт випромінювання металевих деталей конструкції об'єкта в результаті застосування маскувального покриття знаходиться в межах оптимальних значень 0,76 – 0,93.

4.8 Підтвердження нових наукових результатів, отриманих в роботі, результатами напівнатурного експерименту

Перший науковий результат (удосконалення моделі захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону) підтверджується тим, що, як показав напівнатурний експеримент, необхідним є комплексне урахування впливу на процес виявлення об'єкта і формування поточного радіометричного зображення за умови роботи кореляційно-екстремальної системи виявлення, наступних факторів:

- середовища поширення, часу зйомки (вдень, вночі), пори року, наявності чи відсутності осадків (дощ, сніг, туман), наявності пилу, димів, стану фону;

– зовнішніх перешкод, як активних (міцні детерміновані випромінювання), так і пасивних (маскувальні покритті), які знижують контраст «об’єкт – фон»;

– внутрішні шуми РМ приймача, а також різного роду спотворень радіометричних зображень.

Другий науковий результат (вдосконалення методики оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об’єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону) підтверджується результатами оцінки ймовірності виявлення малорозмірних наземних об’єктів матричними радіометричними системами виявлення міліметрового діапазону, як у пасивному режимі, так і в режимі з підсвічуванням шумовим широкосмуговим і детермінованим вузькосмуговим випромінюванням.

Третій науковий результат (розроблений вперше метод вирівнювання радіотеплових температур об’єкта і фона на вході радіометричного приймача системи виявлення) підтверджується тим, що забезпечується зниження контрасту «наземний об’єкт – фон земної поверхні» до малої величини, яка не дозволяє виявити об’єкт на заданій дальності пасивною радіометричною системою виявлення.

Четвертий науковий результат (подальший розвиток декомпозиційного методу) підтверджується можливістю формування радіометричного зображення малорозмірного наземного об’єкта, крім дальньої зони антени, у ближній і проміжній зонах антени.

4.9 Розробка практичних рекомендацій щодо застосування методів і засобів захисту малорозмірних наземних об’єктів

4.9.1 Рекомендації щодо засобів маскування. У роботах [82 – 87] наведено аналіз методів і засобів захисту малорозмірних наземних об’єктів від пасивно-активних систем виявлення (розвідки) міліметрового діапазону. Проаналізовано активні методи захисту, такі як створення потужних

вузькосмугових перешкод на вході РМ приймача системи виявлення, які можуть зривати роботу розвідувального приймача. В якості такого методу досліджено можливість вирівнювання радіотеплових температур об'єкту і навколишнього фону за рахунок підсвічування об'єкта, який потребує захисту від систем виявлення, шумовим випромінюванням власного джерела підсвічування. Це дозволить зменшити контраст «об'єкт – фон» до неприйнятного рівня для РМ приймача системи виявлення. Розглянуто також пасивні методи захисту, які полягають в маскуванні об'єкту за рахунок радіопоглинаючого покриття, що також знижує величину контрасту радіояскравості, тобто відношення сигнал – шум на вході РМ розвідувального приймача, нижче прийнятного для надійної роботи приймача рівня. У зазначених роботах [82 – 87] наведені технічні засоби, що дозволяють реалізувати зазначені методи захисту. Перераховані методи і засоби призводять до зниження ймовірності та зменшення дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів пасивно-активними системами виявлення.

Для оцінки ефективності пропонованих методів і засобів захисту потрібно провести ретельний аналіз і надати прогноз розвитку засобів захисту з необхідними характеристиками.

4.9.2 Прогноз та рекомендації. Розроблювані нові радіопоглинаючі матеріали повинні бути високотехнологічними, полегшеними, забезпечувати маскування об'єктів від засобів розвідки оптичного, в тому числі інфрачервоного, діапазону хвиль, а також від систем і засобів виявлення та розвідки міліметрового, сантиметрового і дециметрового діапазонів.

Конструкція радіопоглинаючих матеріалів (РПМ) повинна дозволити створювати різні засоби зниження помітності типу «маска – перекриття», у вигляді чохла або накидки будь-яких розмірів і форм. Деформуюче забарвлення (камуфляж) повинно виконуватися безпосередньо на покритті. Високий рівень повітря і вологопроникливість потрібна для забезпечення стабільності коефіцієнта відбиття за будь-яких погодних умов. Технологія складання такого РПМ повинна дозволити створювати засоби зниження помітності будь-якої

конфігурації і розмірів, які підтримують високу швидкість «знімання – одягання» РПМ на об'єкт, що захищається.

Нові багатофункціональні матеріали покриттів і виробів на їх основі, що забезпечують зниження помітності і маскування наземних об'єктів, в тому числі об'єктів військової техніки, захист інформації, індивідуальні та колективні засоби захисту технічного персоналу в широкому діапазоні довжин хвиль, повинні створюватися на основі резистивних об'ємних матеріалів з різними властивостями електропровідності і відносної діелектричної проникності, що дозволяє отримувати оптимальні за радіотехнічними характеристиками багат шарові і градієнтні конструкції [84].

Найбільш оптимальною конструкцією надширокодіапазоного РПМ вибрано покриття килимового типу на основі електропровідних ниток, що призначені для створення радіопоглинаючих покриттів різного застосування [87]. Застосування такого широкосмугового маскувального покриття, яке може стаціонарно встановлюватись на об'єкті, дозволяє не тільки змінити зовнішній облік об'єкта, який потребує захисту від радіометричних систем виявлення, а й знизити рівень відбиття і контраст «об'єкт – фон». Характеристики зазначеного покриття наведені в Табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Технічні характеристики маскувального матеріалу

Технічні характеристики	Кількісні показники
Робочий діапазон довжин хвиль	(0,2–25) см
Коефіцієнт відбиття не нижче	–17 дБ
Робочий діапазон температур	(–60 ÷ +80) °С
РПМ – самозагасаючий, екологічно безпечний, стійкий до дії вологи і паливно-мастильних матеріалів	
Кольори окраски покриття можуть бути будь-якими (згідно вимог замовника)	

На цей момент ведеться технологічне відпрацювання спеціального складу радіопоглинаючого шару, що містить вуглецеві нанотрубки і ферити, які мають високу температуру точки Кюрі. Отриманий композиційний матеріал, що має електропровідні та магнітні включення, пров'язується вузькими стрічками різної висоти з металізованої плівки ПЕТФ, що вкрита спеціально розробленою системою лакофарбового покриття. Необхідні технічні характеристики покриття отримані шляхом підбору хімічного складу покриття, товщини і поверхневого опору провідного шару, а також оптимізації геометрії побудови покриття.

Зазначені технічні характеристики РПМ забезпечені за рахунок поглинаючих властивостей основи килимового покриття, а також в результаті оптимізації конфігурації покриття і створення високотехнологічного матеріалу ворсу. Комплекс лакофарбового зовнішнього покриття має підвищену стійкість до впливу факторів зовнішнього середовища (сонячної радіації, температури, вологи, агресивних газів). Настільки широкий спектр вимог до РПМ, що створюється, пов'язано з принциповими обмеженнями, що співвідносять товщину матеріалу, необхідну для досягнення функціональності, з ефективною довжиною хвилі і дисперсією діелектричної і магнітної проникностей. Все це вимагає пошуку компромісних рішень. Великою проблемою є визначення оптимального компромісу для матеріалу з високим співвідношенням «якість / ціна».

4.9.3. Загальні рекомендації щодо застосування методів і засобів зниження помітності для рухомих наземних об'єктів від радіометричних систем виявлення. Зниження контрасту термодинамічних температур об'єкта і навколишнього фону, ефективне зниження помітності об'єктів від засобів розвідки інфрачервоного діапазону, практично не впливає на виявлення об'єкта засобами і системами радіотеплолокації.

Ефективним методом маскування агрегату від засобів радіотеплової розвідки можуть виступати маскувальні покриття у вигляді радіопоглинаючих матеріалів [42, 43], а також підручні матеріали – рослинність, пісок і ґрунт. При

покритті тільки горизонтальних поверхонь ймовірність виявлення частково вкритого ґрунтом агрегату значно знижується порівняно з агрегатом без такого покриття.

Для зниження контрасту радіотеплових температур «об'єкт – фон земної поверхні» рекомендується [25, 26, 82 – 86]:

- застосовувати широкосмугові МП – радіопоглинаючі матеріали, в тому числі МП на основі сітки, що забезпечують на довжинах хвиль 3,2 мм, 8,6 мм коефіцієнт відбиття не більше 5%;
- товщина радіопоглинаючих матеріалів повинна бути не менше 1 см;
- бажано застосування матеріалів, що мають грубу шорстку поверхню, величина неоднорідностей якої порівнянна з довжиною хвилі;
- забезпечити ступінь закриття горизонтальних і похилих (до 45° до горизонту) поверхонь об'єкта радіопоглинаючими покриттями на рівні (80-90) %;
- максимально використовувати композиційні матеріали і екрани з неметалевих матеріалів з нанесеними радіопоглинаючими матеріалами;
- для зниження помітності наземного об'єкта бажано виготовляти дах і борта об'єкта з матеріалів, що мають коефіцієнт випромінювання, близький до коефіцієнту випромінювання земних покривів (не менше 0,8);
- вертикальні ділянки корпусу, по можливості, необхідно замінити ділянками з негативним нахилом до горизонту, що дозволить знизити відбиття головного джерела підсвічування – неба в міліметровому і сантиметровому діапазонах хвиль.

Таким чином, проведений аналіз методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів, дозволяє виділити основні напрямки розвитку і вдосконалення засобів маскуванню наземних об'єктів, що задовольняють комплексу суперечливих вимог. Докладний аналіз, систематизація засобів маскуванню, які відповідають перерахованим вимогам, дозволить конкретизувати засоби маскуванню, що відповідають головному критерію

«ефективність – вартість», для різних класів малорозмірних рухомих наземних об'єктів.

Висновки до розділу 4

1. Вперше розроблено метод вирівнювання радіотеплових температур об'єкта і фону на вході радіометричного приймача, що забезпечує зниження контрасту «наземний об'єкт – фон земної поверхні» до значень, що не дозволяють виявити об'єкт на заданій дальності пасивним радіометричним приймачем системи виявлення противника [76, 77].

В рамках даного методу вперше зроблено припущення про те, що за рахунок поступового підвищення потужності джерела власного шумового підсвічування, що генерує шумовий сигнал в бік наземного об'єкта, який потрібно захистити від систем виявлення та розвідки, можливо суттєво зменшити імовірність і дальність виявлення об'єкта пасивною радіометричною системою. З цією метою потужність джерела підсвічування слід підвищувати від нульового рівня до рівня, за якого власний РМ датчик, співвісний з джерелом, не прийме сигнал від наземного об'єкта, з мінімальним, зокрема нульовим, контрастом «об'єкт – фон»,

2. Новизна запропонованого методу активного захисту полягає в тому, що користуючись отриманими в роботі співвідношеннями для величини радіотеплового контрасту «об'єкт – фон», вперше проведені оцінки ступеня зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів з урахуванням зміни кутів візування системи виявлення, кута місця і азимуту.

3. Визначено, що для розглянутої геометрії візування наземного об'єкта власним радіометричним датчиком з підсвічуванням і системою виявлення противника, величина потужності джерела власного шумового підсвічування, яка дозволяє знизити рівень контрасту «об'єкт - фон», нижча за мінімальне значення, яке потрібне для стійкого виявлення об'єкта.

4. Достовірність наведених результатів обґрунтована тим, що результати проведених розрахунків за отриманими виразами для радіотеплового контрасту

«об'єкт – фон» і потужності підсвічування добре узгоджуються з результатами аналогічних оцінок, отриманих іншими авторами для матричних радіометричних систем [25 – 27].

5. Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні вимог до систем та засобів активного захисту малорозмірних наземних рухомих об'єктів від радіометричних пасивних систем виявлення міліметрового діапазону.

6. Отримав подальший розвиток декомпозиційний метод, який відрізняється від відомих можливістю формування радіометричного зображення малорозмірного наземного об'єкту в ближній, проміжній і дальній зонах антени пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим або вузькосмуговим детермінованим сигналом [77, 79, 80, 106].

7. У рамках даного методу вперше зроблено припущення про те, що візування об'єкта здійснюється з однієї точки за допомогою сканування діаграми спрямованості антени радіометричного вимірювального комплексу, а не за рахунок паралельного перенесення антени вимірювача коефіцієнту відбиття.

8. Новизна запропонованого методу полягає в тому, що зображення площинного об'єкта формується як сума полів випромінювання окремих елементів об'єкта, що відповідають за розмірами роздільній здатності системи, шляхом сканування сцени радіометричним датчиком міліметрового діапазону в ближній і проміжній зонах антени.

9. Достовірність отриманих результатів обумовлена збігом результатів вимірювань даним методом з результатами, отриманими методом декомпозиції за допомогою радіолокаційних вимірювачів коефіцієнта відбиття в ближній і проміжній зонах антени.

10. Отримані результати можуть бути використані при тестуванні наземних об'єктів складної форми на предмет виявлення негативних рівнів

випромінювання окремих елементів об'єкта, в ході проектування і доопрацювання конструкції об'єкта.

11. Проведені напівнатурні експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про ефективність застосування маскувальних покриттів на основі сітки (типу «Контраст») для пасивного захисту малорозмірних об'єктів від пасивних і пасивно-активних систем виявлення і розвідки.

12. Виконано аналіз цифрових масивів зображень об'єктів (незамаскованих і замаскованих), записаних у вигляді текстового файлу, що містить таблицю значень (відліків) аналого-цифрового перетворювача.

13. Так, застосування одношарового покриття знижує контраст «об'єкт – фон земної поверхні» не менше ніж на 5,4 дБ, тобто в 3,47 разів. Це, згідно методики з розд. 3, дозволить зменшити дальність виявлення об'єкта із заданою імовірністю *як мінімум в два рази*.

14. Застосування двошарового покриття знижує контраст на 8 дБ, тобто в 6 разів, що зменшує *дальність виявлення в 2-2,5 рази*.

15. Проведено аналіз, надано прогноз і розроблені рекомендації по розробці і створенню перспективних маскувальних покриттів для пасивного захисту наземних об'єктів спеціальної техніки.

16. Дані, що були отримані експериментальним шляхом, добре погоджуються з теоретичними передумовами, які наведені в відомих роботах інших авторів, а також в даній роботі.

17. Результати експериментальних досліджень, розроблені практичні рекомендації щодо застосування методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів підтверджують практично всі нові наукові результати, представлені в даній дисертаційній роботі.

18. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отримані експериментальним шляхом дані можуть бути використані для оцінки ефективності методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів, які застосовуються, як в ході проектування, так і в процесі створення власне об'єктів спеціальної техніки.

19. Основні положення даного розділу викладені у публікаціях автора [41, 77, 82, 96, 103, 106].

ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язана актуальна важлива наукова задача зниження радіометричної помітності малорозмірних наземних рухомих об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

1. В дисертації проаналізовані можливості застосування радіолокаційних і радіометричних систем і засобів сантиметрового і міліметрового діапазонів хвиль, які здійснюють виявлення і розвідку, а при необхідності і наведення високоточної зброї на малорозмірні, в тому числі рухомі, наземні об'єкти. Проаналізовані основні тактико-технічні характеристики систем виявлення, такі як точність виявлення та ідентифікації наземних об'єктів, усепогодність, дальність дії, швидкодія, завадозахищеність, масогабаритні і вартісні характеристики. Зроблено висновок, що перспективними для застосування по малорозмірним наземним об'єктам є матричні радіометричні пасивно-активні системи виявлення восьми і трьох міліметрового діапазонів хвиль.

2. З аналізу можливих систем і засобів виявлення зроблено висновок, що для ефективного захисту наземних малорозмірних, в тому числі, рухомих об'єктів необхідно застосовувати активні і пасивні методи і засоби захисту, які спрямовані на зниження відношення сигнал – шум на вході радіометричного приймача системи виявлення (розвідки). Щодо радіометричних систем це визначається у зниженні контрасту радіояскравості «малорозмірний об'єкт – фон земної поверхні» до таких величин, які не дозволяють системі виявлення прийняти однозначне рішення про наявність об'єкта в заданому об'ємі простору. Зроблено висновок про необхідність комплексного дослідження методів захисту і технічних характеристик засобів захисту об'єктів від означених систем виявлення.

3. В результаті вирішення наукової задачі отримані наступні найбільш важливі *наукові результати*:

3.1. Вперше розроблено метод вирівнювання температур радіояскравості об'єкта і фону на вході радіометричного приймача, що забезпечує зниження контрасту «наземний об'єкт – фон земної поверхні» до значень, які не дозволяють виявити об'єкт на заданій дальності пасивним радіометричним приймачем системи виявлення.

В рамках даного методу вперше зроблено висновок, що джерело власного шумового підсвічування генерує шумовий сигнал в напрямку наземного об'єкта, що виявляється, міцність сигналу поступово підвищується до тих пір, доки особистий радіометричний датчик, який знаходиться на одному носії з джерелом підсвічування, не прийме сигнал, перевідбитий наземним об'єктом, з мінімальним, частково нульовим, контрастом «об'єкт – фон», що зменшує ймовірність і дальність виявлення об'єкта пасивною радіометричною системою.

Новизна даного методу активного захисту полягає в тому, що за допомогою отриманих в роботі співвідношень для величини контрасту радіояскравості «об'єкт – фон», вперше приведено оцінки ступеня зниження помітності малорозмірних наземних об'єктів з урахуванням змін кутів візування системи виявлення, кута місця і азимуту.

3.2. Удосконалена модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону.

В рамках даної моделі вперше визначені фізичні механізми впливу різних факторів на процес приймання та обробки сигналу, а також на формування зображення наземного об'єкта пасивно-активною радіометричною системою, що дозволяє знизити ймовірність виявлення об'єкта і зменшити дальність виявлення.

3.3. Удосконалена методика оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону, яка, на відміну від відомих методик, дозволяє оцінити зниження дальності виявлення матричними радіометричними системами в пасивному режимі і в режимі з широкосмуговим шумовим підсвічуванням об'єкта під маскувальним покриттям в площині кутів місця і азимуту.

В рамках даної методики вперше отримано аналітичний вираз для ймовірності правильного виявлення малорозмірного наземного об'єкта при заданих значеннях ймовірності хибної тривоги, в яких ураховані параметри матричної радіометричної системи виявлення. Вперше отримані аналітичні вирази для радіометричного контрасту і міцності джерела випромінювання для однопозиційного та двохпозиційного підсвічування малорозмірного наземного об'єкта з урахуванням характеристик маскувального покриття при різних кутах місця і азимуту.

3.4. Отримав подальший розвиток метод декомпозиції, який на відміну від відомих, дозволяє формувати радіометричне зображення малорозмірного наземного об'єкта в ближній, проміжній та дальній зоні антени пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим чи вузькосмуговим детермінованим випромінюванням.

В рамках даного методу вперше зроблено висновок про те, що візування об'єкта здійснюється з однієї точки завдяки скануванню діаграми спрямованості антени радіометричного вимірювального комплексу, а не за рахунок паралельного переносу антени вимірювача коефіцієнта відбиття.

Новизна методу полягає в тому, що зображення наземного об'єкта складної конфігурації формується як сума полів випромінювання окремих елементів розрізнення об'єкта шляхом сканування радіометричним датчиком міліметрового діапазону у ближній, проміжній і дальній зонах антени.

4. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені математичні моделі і методи являють собою методику оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів, до яких застосовані активні і пасивні методи захисту, і складають основу розробки і проектування засобів маскування для створення малорозмірних наземних об'єктів малої помітності в видимому і радіодіапазонах хвиль.

5. Проведені в дисертаційній роботі дослідження дозволяють сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо застосування методів і

створення засобів, які зменшують оптичну і радіопомітність малорозмірних наземних об'єктів.

При застосуванні методів пасивного захисту об'єктів для зниження контрасту температур радіояскравості «об'єкт – фон земної поверхні» рекомендується:

- застосовувати широкосмугові маскувальні покриття – радіопоглинаючі матеріали, в тому числі маскувальні покриття на сітковій основі, які забезпечують на довжинах хвиль 3,2 мм, 8,6 мм коефіцієнт відбиття не більш 5 %, а коефіцієнт поглинання 10 дБ і більше;
- товщина радіопоглинаючого матеріалу повинна бути не менш 1 см;
- треба застосовувати матеріали, які мають грубу неоднорідну поверхню, величина неоднорідностей таких матеріалів близька до довжини хвилі;
- забезпечити ступінь закриття горизонтальних і похилених (до 45° до горизонту) поверхонь об'єкта радіопоглинаючими покриттями на рівні (80–90) %;
- максимально застосовувати композитні матеріали і екрани з неметалевих матеріалів з нанесеними радіопоглинаючими матеріалами;
- для зниження помітності наземного об'єкта переважно виготовлювати кришу і борта об'єкта з матеріалів, які мають коефіцієнт випромінювання, близький до коефіцієнту випромінювання земних покривів (не менш 0,8);
- вертикальні частки корпусу об'єкта, по можливості, необхідно замінити частками, які нахилені негативно до горизонту, що дозволить знизити відбиття головного джерела підсвічування – неба в міліметровому і сантиметровому діапазонах хвиль.

При застосуванні методів активного захисту об'єктів для зниження контрасту температур радіояскравості «об'єкт – фон земної поверхні» рекомендується: щільно підходити до вибору висоти (дальності) розташування джерела особистого підсвічування, вибору оптимальної міцності джерела

підсвічування, оперативного контролю і регулюванню відношення сигнал – шум на вході особистого радіометричного приймача і міцності джерела підсвічування.

6. *Обґрунтованість і достовірність* основних наукових положень, висновків і рекомендацій, отриманих в дисертаційній роботі.

Обґрунтованість підтверджується коректною постановкою задач, коректним застосуванням положень теорії систем радіотеплолокації і кореляційно-екстремальних систем навігації, теорії ймовірностей, математичної статистики.

Достовірність підтверджується тим, що результати не суперечать відомим закономірностям, а також їх співпадінням в граничних випадках з відомими результатами і результатами експериментальних досліджень, апробацією результатів роботи на науково-технічних семінарах і конференціях.

7. Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані:

- при розробці та модернізації засобів пасивного і активного захисту малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем виявлення і розвідки;

- в учбових дисциплінах, пов'язаних з аналізом методів та засобів захисту наземних об'єктів від радіолокаційних та радіометричних систем виявлення і розвідки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Военна доктрина України : указ Президента України від 24 вересня 2015 року, № 555/2015.
2. Тактична підготовка артилерійських підрозділів : підручник / П. Є. Трофименко та ін. Суми : Сумський державний університет, 2012. 776 с.
3. Гирин А. В. Взгляды командования ОВС НАТО на подготовку и ведение оборонительных операций, 2011. URL: <http://www.samlib.ru/a/aleksandr>.
4. Омичев Ю. Вооруженные силы США // Зарубежное военное обозрение. 1989. № 1. С. 7-10.
5. Григорьев А. Зарубежные управляемые ракеты класса «воздух – земля» большой дальности // Зарубежное военное обозрение. 1998. № 11. С. 33–37.
6. Дмитриев В. Новая управляемая ракета UOSP класса «Воздух – земля» // Зарубежное военное обозрение. 1984. № 6. С. 52–54.
7. Сокут С. Вашингтон реанимирует «Першинги», 2000. URL: http://www.ng.ru/politics/2000-11-17/1_pershing.html.
8. Сокут С. Вашингтон нашел замену «Першингам» // Независимое военное обозрение. 2000. 24 лист. (№ 42). С. 1.
9. Сокут С. Боевые ракеты. Ракета «Першинг – 2» // Ракетная и космическая техника. ЦНТИ «Поиск». 1984. № 15 (1279). С. 1 – 8.
10. Ржевкин В. А. Автономная навигация по картам местности // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 10. С.3 – 28.
11. Белов А., Валентинов А. Совершенствование крылатой ракеты «ТОМАХОК» // Зарубежное военное обозрение. 1996. № 11. С. 44 – 49.
12. Ильин В., Скрынников Ф. Крылатые ракеты: настоящее и будущее // Вестник авиации и космонавтики. 2002. № 4. С. 86 – 89.
13. Пауков В. Работы в США по совершенствованию ракетной системы АТАСМС // Зарубежное военное обозрение. 2000. № 3. С. 25 – 28.

14. Гурский Б., Свободин А. Системы наведения ракет класса «земля–земля» – основа дальнего огневого поражения наземных целей // Военный парад. 2003. С. 24-26.
15. Растопшин М. Артиллерийские высокоточные боеприпасы // Техника и вооружение. 1999. № 8. С. 4 – 8.
16. Повітряна розвідка: Елементи організації і тактичні розрахунки / С. П. Мосов та ін. ; за заг. ред. Ю. К. Ребріна. Київ: МО України, 1999. 334 с.
17. Nardon, L. The Dilemma of Satellite Imagery Control / Military Technology. 2002. Vol. 26, Issue 7. P. 37 – 45.
18. Красовский А. А. Белоглазов И. Н., Чигин Г. П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. Москва : Наука, 1979. 448 с.
19. Баклицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. Москва : Сов. Радио, 1986. 216 с.
20. Баклицкий В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь : ТО «Книжный клуб», 2009. 360 с.
21. Красовский А. А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. Москва : Наука, 1973. 558 с.
22. Меркулов В. И., Дрогалин В. В., Перов А. И., Абдулов А. А. Автономные и комбинированные системы наведения самолетов и ракет. Москва : Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1996. 88 с.
23. Максимов М. В., Горгонов Г. И. Радиоэлектронные системы самонаведения. Москва : Радио и связь, 1982. 304 с.
24. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Я. Д. Ширман и др. ; под ред. Я. Д. Ширмана. Москва : Радиотехника, 2007. 512 с.
25. Антюфеев В. И., Быков В.Н., Гричанюк А. М., Краюшкин В. А. Радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации

летательных аппаратов: монография. Харьков : ХНУ имени В.Н. Каразина, 2008. 356 с.

26. Применение принципов радиометрии в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов: монография / В. И. Антюфеев и др. Москва : Физматлит, 2009. 352 с.

27. Матричные радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов / В. И. Антюфеев и др. Харьков : Изд-во ООО «Щедрая усадьба плюс», 2014. 372 с.

28. Голдмис П. Ф. Системы формирования изображений в фокальной плоскости в миллиметровом диапазоне длин волн // ТИИЭР. 1993. Т. 41, № 10. С. 1-24.

29. Радзиховский В. Н., Горишняк В. Н., Кузьмин С. Е., Шевчук Б. М. Многоканальная радиометрическая система формирования изображений 8мм диапазона волн // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1999. Т. 42, № 4. С. 37-41.

30. Gorishniak V. P., Denisov A. G., Kuzmin S. E., Radzikhovsry V. N., Shevchuk B. M. Passive multichannel millimeter-waves imaging system // MSMW 2004 : The Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and SubMillimeter Waves,. Symposium Proceedings, June 21 – 26, 2004. Kharkov, 2004. Vol. 1. P. 202 – 204.

31. Berezhnoy V. A., Muskin Y. N., Chmil V. M., Antyufeev V. I., Bykov V. N. Radiometry Complex «Zir» for High-Speed Radio-Wave Image // MSMW 2007 : The sixth international Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves. Millimeter and SubMillimeter waves and Workshop on Terahertz Technologies, June 25–30, 2007. Kharkov, 2007. P. 887 – 889.

32. Хайкин В. Б., Стороженко А. А., Лебедев М. К., Радзиховский В. Н., Кузьмин С. Е., Шлензин С. В. Многоэлементная приемная матричная система 8 мм диапазона для задач пассивного радиовидения // Журнал радиоэлектроники, 2014. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/index.html>.

33. Быков В. Н., Иванченко Д. Д., Колчигин Н. Н., Краюшкин В. А., Осинский Г. Г., Радзиховский В. Н. Малогабаритные всепогодные датчики

внешнего поля для систем навигации летательных аппаратов // Системи озброєння і військова техніка. 2016. Т. 45, № 1. С. 94-101.

34. Мур Р., Уайт В., Роуз Дж. Панхроматический и полипанхроматический радиолокаторы // ТИИЭР. 1969. № 57. С. 590-593.

35. Seashore C. R., Milley J. E., Kearns B. A. MM-wave Radar and radiometric sensors for guidance systems // Microwave J. 1979. Vol. 22, N 8. P. 47-51.

36. Быков В. Н., Ивашов С. И., Овсянников Ю. В. и др. Повышение информативности радиометрических изображений благодаря применению шумовой подсветки // Радиотехника. 1997. Вып. 101. С. 33-39.

37. Быков В. Н. Обнаружение малоразмерных объектов радиометрическими информационными системами миллиметрового диапазона с шумовой подсветкой / Радіoeлектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». 2005. Т. 10, Вип. 2. С. 5-10.

38. Антюфеев В. И., Быков В. Н., Косухин В. Ю., Бережная Т. Д. Анализ влияния ширины полосы сигнала подсветки наземных объектов на качество функционирования радиометрических информационных систем // Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. ОНДІ ЗС. 2007. Т. 7, Вип. 2. С. 80-87.

39. Быков В. Н., Косухин В. Ю. Теоретическая и экспериментальная оценка возможности совмещения пассивного и активного каналов в радиометрических информационных системах // Системи обробки інформації. ХВУ. 2004. Вип. 6. С. 29-35.

40. Антюфеев В. И., Быков В. Н., Иванченко Д. Д., Колчигин Н. Н., Бережная Т. Д. Обнаружение малоразмерных наземных объектов матричными радиометрическими системами с шумовой подсветкой // Радіoeлектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». 2013. Т. 61, Вип. 2. С. 7-13.

41. Быков В. Н., Колчигин Н. Н., Осинский Г. Г., Бережная Т. Д. Оценка эффективности средств защиты малоразмерных наземных объектов от пассивно-активных радиометрических систем обнаружения // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника», Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2016. Т. 15, № 1. С. 45-50.

42. Ткаліч М. В., Топчев М. Д., Комаров В. О., Глебов В. В., Ващенко В. П. Під українським маскувальним покриттям – танка не видно // Винахідник і раціоналізатор. 2002. № 2-3. С. 5-6.

43. Веретенников А. И., Рассказов И. И., Пивнев А. С., Сидоров К. В., Решетило Е. И. Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А. Морозова, 3-е изд. Харьков : ТО «СИНТЕЗ», 2002. 176с.

44. Николаев А. Г., Перцов С. В. Радиотеплолокация. Москва : Сов. Радио, 1964. 132 с.

45. Шифрин К. С., Рабинович Ю. И., Щукин Г. Г. Исследование поля микроволнового излучения в атмосфере // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 1968. № 222. С. 5-18.

46. Башаринов А. Е., Тучков Л. Т., Поляков В. М., Ананов Н. И. Измерение радиотепловых и плазменных излучений. Москва : Сов. Радио, 1968. 390 с.

47. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. Москва : Наука, 1973. 416 с.

48. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты // Москва : Наука, 1974. 188 с.

49. Справочник по радиолокации. Т.4. Радиолокационные станции и системы; под ред. М. Скольника. Москва : Сов. Радио, 1978. 376 с.

50. Андреев Г. А., Голунов В. А., Соколов А. В. Рассеяние и излучение миллиметровых радиоволн природными образованиями // Итоги науки и техники, ВИНТИ. Сер. Радиотехника. 1980. Т. 20. С. 3-106.

51. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами. Киев : Наукова думка, 1987. 232 с.
52. Михайлов В. Ф., Брагин И. В., Брагин С. И. Спутниковая аппаратура дистанционного зондирования Земли. Москва : Вузовская книга, 2008. 340 с.
53. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва: Радио и связь, 1989. 656 с.
54. Локационная системотехника ; под ред. В.Б. Алмазова. Харьков : МО Украины, 1993. 618 с.
55. Косухин В. Ю. Оценка точности радиометрических систем самонаведения / Системи обробки інформації. // ХАРЬКОВ : НАНУ, ПАНМ, ХВУ. 2004. Вип. 4. С. 51-55.
56. Биков В. М. Житник В. Є., Косухин В. Ю. Оцінка точності головок самонаведення керованих артилерійських боєприпасів // Труди академії. Киев: НАОУ. 2004. Вип. 14. С. 43-48.
57. Харкевич А. А. Борьба с помехами. Москва : Наука, 1965. 275 с.
58. Иощенко А. Н. Помехоустойчивость широкополосных систем связи при различных методах подавления сосредоточенных по спектру помех // Тр. учебных институтов связи. 1971. Вып. 55. С. 19-30.
59. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. Москва : Воениздат, 1989. 350 с.
60. Фомин А. Ф. Помехоустойчивость систем передачи непрерывных сообщений. Москва : Сов. Радио, 1975. 352 с.
61. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А. Г. Зюко и др. Москва : Сов. Радио, 1985. 272 с.
62. Шаблинский А. С. Принципы обеспечения помехозащищенности систем передачи командной информации. Москва : МО, 1977. 264 с.
63. Быховский М. А. Применение многоканальных компенсаторов помех в каналах связи // Радиотехника. 1984. № 12. С. 9-16.

64. Фалько А. И. К вопросу подавления сосредоточенных помех в широкополосных системах связи // Электросвязь. 1969. № 7. С. 9–14.
65. Агафонов Ю. Н., Антюфеев В. И., Быков В. Н., Кубата В. Г. Адаптивный компенсатор помех в приемниках широкополосных сигналов // Радиотехника. 1998. Вып. 107. С. 64–67.
66. Антюфеев В. И., Макаренко Б. И., Султанов А. С. Синтез устойчивых к вариациям яркости изображения алгоритмов локализации целей в двумерных КЭСН. Сообщение 1. Формализация задачи на основе теории образов Гренандера // Электромагнитные и электронные системы. 1999. Т. 2, № 6. С. 28–33.
67. Антюфеев В. И., Макаренко Б. И., Султанов А. С. Синтез устойчивых к вариациям яркости изображения алгоритмов локализации целей в двумерных КЭСН. Сообщение 2. Выбор эталона максимального сходства и синтез оптимальных алгоритмов // Электромагнитные и электронные системы. 1999. Т. 2, № 6. С. 34–40.
68. Антюфеев В. И., Быков В. Н., Чмиль В. В. Теоретическая оценка эффективности иерархического корреляционного алгоритма совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации // Радиотехника. 2005. Вып. 143. С. 65–71.
69. Антюфеев В. И., Быков В. Н. Сравнительный анализ алгоритмов совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов // Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». 2008. Т. 48, Вып. 1. С. 70–74.
70. Усс М. Л., Комяк В. А. Поиск в пространстве параметров положения и ориентации летательного аппарата в задачах корреляционно-экстремальной навигации // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 8. С. 30–43.
71. Бережной В. А., Кужель В. И., Тузенко А. П., Муськин Ю. Н., Демьяненко Ю. А., Рябчук А. Ф., Санкин В. А., Черний Б. С., Шило С. А. Многоканальный радиометр для систем радиовидения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 3. С. 14–15.

72. Антюфеев В. И., Быков В. Н. Шумовые свойства радиометрических матричных систем формирования изображений с уплотнением канальных сигналов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». 2007. Т. 21, Вип. 2. С.11–15.

73. Антюфеев В. И., Быков В. Н. Потенциальная точность местоопределения радиометрическими матричными системами навигации с уплотнением канальных сигналов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». 2007. Т. 22, Вип. 3. С. 39– 44.

74. Быков В. Н., Сотников А. М., Кожушко Я. Н. Обобщенная модель процесса функционирования матричной радиометрической корреляционно-экстремальной системы навигации миллиметрового диапазона // Системи управління, навігації та зв'язку. Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління. 2009. Т. 11, Вип. 3. С. 13–17.

75. Осинский Г. Г. Модель защиты малоразмерных наземных объектов от радиометрических пассивно-активных систем обнаружения // Харків: «Радіоелектронні і комп'ютерні системи», науково-технічний журнал. ХАІ. 2017. Т. 81, № 1. С.107–112.

76. Спосіб вирівнювання температур радіояскравості об'єкта і фону на вході радіометричного приймача системи виявлення: пат. на корисну модель № 119205 Україна: МПКБ G01S 7/38 (2006.01). заявл.17.05.2017; опуб. 11.09.2017, Бюл. № 17. 6 с.

77. Быков В. Н., Быков С. Н., Колчигин Н. Н., Лотох Н. Г., Осинский Г. Г. Метод активной защиты малоразмерных наземных объектов от пассивных радиометрических систем обнаружения // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника», Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2017. Том 16, № 1,2. С. 13–17.

78. Переносний пристрій для вимірювання коефіцієнта відбиття: пат. на корисну модель № 115935; МПКб G01R 27/06(2006.01); заявл. 30.12.2016; опуб. 25.04.2017, Бюл. № 8. 4 с.

79. Спосіб вимірювання ефективної площі розсіяння великогабаритних об'єктів в ближній зоні: пат. на корисну модель № 119169; МПКб G01S 13/00 (2017.01); заявл. 20.04.2017.; опуб. 11.09.2017, Бюл. № 17. 6 с..

80. Быков В. Н., Быков С. Н., Винниченко С. А., Гричанюк А. М., Колчигин Н. Н., Осинский Г. Г. Развитие метода декомпозиции при формировании радиометрических изображений малоразмерных наземных объектов в ближней и промежуточной зонах антенны // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника», Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2017. Т. 16, № 3-4. С. 106–111.

81. Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Радиотеплолокационные методы определения характеристик влагосодержания облачной атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1987. 284 с.

82. Осинский Г. Г., Субач В. П., Быков В. М., Колчигин М. М. Протидія радіолокаційним засобам виявлення наземних об'єктів // Озброєння та військова техніка : науково-технічний журнал. 2018. Т. 2, № 18. С. 66–71.

83. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники / под общ. ред. П.А. Федюнина. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. 184 с.

84. Защита объектов / В. А. Григорьяни др. ; под общ. ред. В. А. Григоряна. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 327 с.

85. Демаскирующие признаки ОБТ // Сайт «Объекту ПТУР не страшен». URL: <http://armor.kiev.ua/ptur/demask/showpic.html>.

86. РПМ «Накидка» для защиты от разведки и высокоточного оружия // Сайт ОАО «НИИ Стали». URL: http://www.niistali.ru/security/2010-07-05-08-58-15_start-1.

87. Филин С. А., Малохина Л. А. Средства снижения заметности (по патентным материалам). Москва : ИНИЦ Роспатента, 2003. 215 с.
88. Фельд Я. Н., Бененсон Л. С. Антенно–фидерные устройства : в 2 частях / Ч. 2. Москва : ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1959. 551 с.
89. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. Москва : Сов. Радио, 1970. 384 с.
90. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно–фидерные устройства. Москва : Сов. Радио, 1974. 536 с.
91. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов / под общ. ред. Д. И. Воскресенского. Москва : Сов. Радио, 1972. 320 с.
92. Зелкин Е. Г., Петрова Р. А. Линзовые антенны. Москва : Сов. Радио, 1974. 280 с.
93. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие / И. С. Грузман и др. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. 168 с.
94. Прэтт У. К. Цифровая обработка изображений: в 2 кн. Москва : Мир, 1982. Кн. 1, 312 с. Кн. 2, 480 с.
95. Mostafavi H., Smith F. W. Image correlation with geometric distortion // IEEE Transaction. 1978. Vol. AES–14. P. 487–500.
96. Осіновий Г. Г., Субач В. П., Биков В. М., Колчигин М. М. Зниження радіолокаційної помітності літальних апаратів за допомогою Stealth-технологій // Озброєння та військова техніка : науково-технічний журнал. 2018. Т. 2, № 18. С. 71–75.
97. Растопшин М. Пути повышения параметров защиты танков и эффективности противотанковых средств // Техника и вооружение. 2002. №9. С. 18–21.
98. Тарасенко А. Комплексная защита бронетанковой техники. Украинский подход // Техника и вооружение. 2007. № 2. С. 10–16.
99. Заяц В. Применение авиации США на активной фазе операции в Ираке // Зарубежное военное обозрение. 2005. №10. С. 44–53.

100. Глебов В. В. Основные проблемы и направления развития защиты боевых бронированных машин с использованием систем обнаружения электромагнитного излучения // Механіка та машинобудування. 2012. № 2. С. 84–98.

101. Алексеев А. Г., Штагер Е. А., Козырев С. В. Физические основы технологии STEALTH. Санкт-Петербург : ВВМ, 2007. 284 с.

102. Спосіб вимірювання ефективної площі розсіювання великогабаритних об'єктів в ближній зоні: пат. 118237 Україна: МПКБ G01S 13/00, G01R 29/00. № а201703909; заявл. 20.04.2017; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. 6 с.

103. Осиновый Г. Г. Распознавание малоразмерных наземных объектов матричной радиометрической системой миллиметрового диапазона // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2018. Вип. 28. С. 76–81.

104. Pavlikov V. V., Ruzhentsev N. V., Sobkolov A. D., Salnikov D. S., Tsopa A. I. Ground-based radiometric complex of millimeter wave band for meteorology and telecommunications applications // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 76. P. 1477 – 1488.

105. Strizhachenko A. V. Electrodynamical Model of Composite Cylindrical Structure with Laminated Dielectric // Radioelectronics and Communications Systems. 2018. Vol. 61. P. 38 – 43.

106. Antyufeyeva M.S., Butrym A.Y., Kolchigin N.N., Legenkiy M.N., Maslovskiy A.A., Osinovy G.G. Specific RCS for describing the scattering characteristic of complex shape objects // Progress In Electromagnetics Research M. 2016. Vol. 52. P. 191-200.

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові публікації у фахових виданнях України

1. Быков В.Н., Колчигин Н.Н., Осинский Г.Г., Бережная Т.Д. Оценка эффективности средств защиты малоразмерных наземных объектов от пассивно-активных радиометрических систем обнаружения // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника». Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2016. Т. 15, № 1. С. 45 – 50.
(Особистий внесок аспіранта: оцінка ймовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів пасивно-активними радіометричними системами виявлення за запропонованою методикою)
2. Быков В.Н., Быков С.Н., Колчигин Н.Н., Лотох Н.Г., Осинский Г.Г. Метод активной защиты малоразмерных наземных объектов от пассивных радиометрических систем обнаружения // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника». Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2017. Т. 16, № 1,2. С. 13 – 17.
(Особистий внесок аспіранта: постановка задачі, оцінка ефективності методу активного захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивних систем виявлення).
3. Быков В.Н., Быков С.Н., Винниченко С.А., Гричанюк А.М., Колчигин Н.Н., Осинский Г.Г. Развитие метода декомпозиции при формировании радиометрических изображений малоразмерных наземных объектов в ближней и промежуточной зонах антенны // Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника». Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Академия наук прикладной радиоэлектроники. 2017. Т. 16, № 3-4. С. 106– 111.

(Особистий внесок аспіранта: постановка задачі, оцінка ефективності методу декомпозиції, який полягає у формуванні радіометричного зображення малорозмірного наземного об'єкта в ближній, проміжній та дальній зонах пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням широкосмуговим шумовим чи вузькосмуговим детермінованим сигналом).

4. Осіновий Г.Г. Распознавание малоразмерных наземных объектов матричной радиометрической системой миллиметрового диапазона // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2018. Вип. 28. С. 76–81.

Наукові публікації у зарубіжних виданнях

5. Antyufeyeva M.S., Butrym A.Y., Kolchigin N.N., Legenkiy M.N., Maslovskiy A.A., Osinovy G.G. Specific RCS for describing the scattering characteristic of complex shape objects // Progress In Electromagnetics Research M. 2016. Vol. 52. P. 191-200. (SCOPUS, Web of Science)

(Особистий внесок аспіранта: участь у аналізі та обговоренні результатів чисельного експерименту, щодо можливості зниження помітності наземного об'єкту)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Bykov V.N., Bykov S.N., Grichanyuk A.M., Kolchigin N.N., Krayushking V.A., Osinovy G.G., Radzikhovsky V.N., Berezhnaya T.D. The matrix radiometric system for the imaging of ground objects in the millimeter band // MSMW 2016: 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, 20-24 June, 2016, Kharkiv, 2016. 7538063. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7538063>. (SCOPUS)

(Особистий внесок аспіранта: систематизація і аналіз характеристик матричних радіометричних систем виявлення).

7. Bykov V., Bykov S., Kolchigin N., Berezhnaya T.D., Osinovy G. Methods of assessing the effectiveness of the protection of small ground objects from passive-active radiometric detection systems // UWBUSIS 2016 : 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5-11 Sept. 2016,

Odessa, 2016. 7724176, P. 156-159. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7724176>. (SCOPUS)

(Особистий внесок аспіранта: розробка методики оцінки ймовірності і дальності виявлення наземних об'єктів).

8. Bykov V.N., Bykov S.N., Lotoh N.G., Kolchigin N.N., Osinovy G.G., Berezhnaya T.D. Methods of Active Protection of Small-Sized Ground Objects from Radiometric Millimeter Range Detection Systems // UWBUSIS 2018 : 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 4-7 Sept. 2018. Odessa, 2018. 8520172, P. 243-246. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7724176>. (SCOPUS)

(Особистий внесок аспіранта: виконання розрахунків та оцінка ефективності засобів активного захисту наземних об'єктів від радіометричних систем виявлення).

Наукові публікації, що додатково відображають зміст дисертації

9. Быков В.Н., Иванченко Д.Д., Колчигин Н.Н., Краюшкин В.А., Осиновый Г.Г., Радзиховский В.Н. Малогабаритные всепогодные датчики внешнего поля для систем навигации летательных аппаратов // Системы озброєння і військова техніка. 2016. Т. 45, № 1. С. 94 – 101.

(Особистий внесок аспіранта: системний аналіз складу й характеристик малогабаритних всепогодних датчиків зовнішнього поля, які застосовуються в системах виявлення наземних об'єктів).

10. Осиновый Г.Г., Быков В.Н. Модель защиты малоразмерных наземных объектов от радиометрических пассивно-активных систем обнаружения // Радіoeлектронні і комп'ютерні системи: науково-технічний журнал. 2017. Т. 81, № 1. С.107–112.

(Особистий внесок аспіранта: постановка й розв'язання задачі моделювання захисту малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем виявлення).

11. Осіновий Г.Г., Субач В.П., Биков В.М., Колчигін М.М. Протидія радіолокаційним засобам виявлення наземних об'єктів // Озброєння та військова техніка : науково-технічний журнал. 2018. Т. 2, № 18. С. 66–70.

(Особистий внесок аспіранта: проведення експериментальних досліджень, оцінка результатів вимірювань, розробка практичних рекомендацій щодо створення методів і засобів захисту малорозмірних рухомих наземних об'єктів від матричних радіометричних пасивно-активних систем виявлення ММД).

12. Осіновий Г.Г., Субач В.П., Биков В.М., Колчигін М.М. Зниження радіолокаційної помітності літальних апаратів за допомогою Stealth-технологій // Озброєння та військова техніка : науково-технічний журнал. 2018. Т. 2, № 18. С. 71–74.

(Особистий внесок аспіранта: оцінка результатів експериментів, розробка практичних рекомендацій щодо створення методів і засобів захисту малорозмірних рухомих наземних об'єктів від радіоелектронних засобів розвідки).

Патенти

13. Спосіб вимірювання ефективної площі розсіювання великогабаритних об'єктів в ближній зоні: пат. 118237 Україна: МПКб G01S 13/00, G01R 29/00. № а201703909; заявл. 20.04.2017; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. С. 4.

(Особистий внесок аспіранта: постановка задачі і створення вимірювальної схеми, яка реалізує метод декомпозиції).

14. Спосіб вирівнювання температур радіояскравості об'єкта і фону на вході радіометричного приймача системи виявлення: пат. 118995 Україна: МПКб G01S 7/38 (2006.01), F41H 3/00. № а201704777; заявл. 17.05.2017; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7. С. 4.

(Особистий внесок аспіранта: розробка основ методу вирівнювання температур радіояскравості на вході радіометричного приймача пасивної системи виявлення).

ДОДАТОК Б

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи ДП “КБ “Південне” імені
М.К. Янгеля”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник Генерального
конструктора – Генерального директора
з системного проєктування
Державного підприємства
“Конструкторське бюро “Південне”



О.П.Кушнар'єв

2017 р.

Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Осінового Г. Г. "Методика оцінки імовірності та дальності виявлення
малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних
систем міліметрового діапазону",
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Комісія Державного підприємства “Конструкторське бюро “Південне” у складі голови комісії головного конструктора напрямку С.Е. Бойчуна та членів: провідного конструктора комплексу Субача В.П., провідного конструктора Бажутіна О.М., визначає, що матеріали та результати дисертаційних досліджень зі зниження імовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів на основі застосування активних і пасивних методів та засобів захисту були використані в ході робіт по темі «Гром-2».

У дослідженні розв'язуються наступні задачі:

- розробка моделі захисту малорозмірних наземних об'єктів, які ускладнюють виявлення та ідентифікацію об'єктів по радіометричному портрету;
- розробка методики оцінки імовірності та дальності виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами міліметрового діапазону із ширококутовим шумовим підсвічуванням;
- розробка методу вирівнювання радіо яскравих температур об'єкту и фону на вході радіометричного приймача системі виявлення міліметрового діапазону;
- метод формування радіометричного портрету малорозмірних наземних об'єктів у дальній зоні пасивним радіометричним датчиком з підсвічуванням ширококутовим шумовим або вузькосмуговим детермінованим сигналом за допомогою удосконаленого декомпозиційного метода;
- підтвердження ефективності методів і засобів захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем міліметрового діапазону за допомогою експерименту.

Матеріали дисертаційної роботи Осінового Г. Г. були використані при проведенні наукових досліджень у ході дослідно-конструкторської роботи «Гром-2», застосовані в ескізній та робочій конструкторській документації, яка була розроблена в процесі виготовлення демонстраторів. Дисертаційні матеріали знайшли підтвердження при проведенні експериментальних досліджень діючого макета демонстратора (період імплементації 2015-2017).

Внесок дисертанта при пошуку технічних рішень ефективного захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем міліметрового діапазону на етапі ескізного проектування та при випуску РКД є дуже вагомим.

Робота є вкрай актуальною, тому що враховує новітні напрацювання у багатьох наукових та практичних галузях: теоретичній радіофізиці, радіотеплолокації; розробках систем захисту малорозмірних наземних мобільних об'єктів з використанням кореляційно-екстремальних систем навігації та теорії ймовірностей для оцінки імовірності та дальності виявлення; використанні наноматеріалів за для впровадження Stealth-технологій.

Голова комісії

Головний конструктор напрямку Державного підприємства
"Конструкторське бюро "Південне"

" ____ " _____ 2017 р.

С.Є. БОЙЧУН

Члени комісії:

Провідний конструктор комплексу Державного підприємства
"Конструкторське бюро "Південне",

" ____ " _____ 2017 р.

В.П. СУБАЧ

Провідний конструктор Державного підприємства
"Конструкторське бюро "Південне"

" ____ " _____ 2017 р.

О.М. БАЖУТІН

ДОДАТОК В

Акт використання результатів дисертаційної роботи ДП "ХКБМ"



ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН "УКРОБОРОНПРОМ"
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "ХАРКІВСЬКЕ КОНСТРУКТОРСЬКЕ БЮРО
 З МАШИНОБУДУВАННЯ ІМЕНІ О.О. МОРОЗОВА" (ДП "ХКБМ")
 вул. Плеханівська, 126, м. Харків, 61001, тел.: (057) 757-41-44, факс: (057) 757-41-68,
 e-mail: morozov@morozov.com.ua web: www.morozov.com.ua, код ЄДРПОУ 14310299

№ _____

на № _____ від _____ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний конструктор підприємства
В.А. Жадан
 2019

А К Т

щодо використання результатів дисертаційної роботи
ОСІНОВОГО Геннадія Геннадійовича, представленої на здобуття
 вченого ступеня кандидати фізико-математичних наук

Комісія у складі голови комісії - д.т.н., с.н.с. В.В. Глебова,
 членів комісії: к.т.н. С.О. Волоснікова та С.О. Роленко

встановила, що наступні наукові положення, розроблені особисто
 Осіновим Геннадієм Геннадійовичем, використані під час оцінки ступеню
 випромінювання об'єктів спеціальної техніки та розробки заходів зменшення її
 помітності від радіометричних систем виявлення міліметрового діапазону, а
 саме:

- методика оцінки ймовірності і дальності виявлення малорозмірних
 наземних об'єктів матричними радіометричними системами виявлення
 міліметрового діапазону з підсвічуванням об'єктів шумовим широкопуговим
 випромінюванням, які знаходяться під маскувальним покриттям;
- результати експериментальної оцінки виявлення і ідентифікації
 зразків спеціальної техніки пасивно-активними радіометричними
 інформаційними датчиками міліметрового діапазону.

Акт не є підставою для фінансових зобов'язань.

Голова комісії

д.т.н., с.н.с. В.В. Глебов

Члени комісії

к.т.н. С.О. Волосніков

С.О. Роленко